

Phys. sp.

453

ch

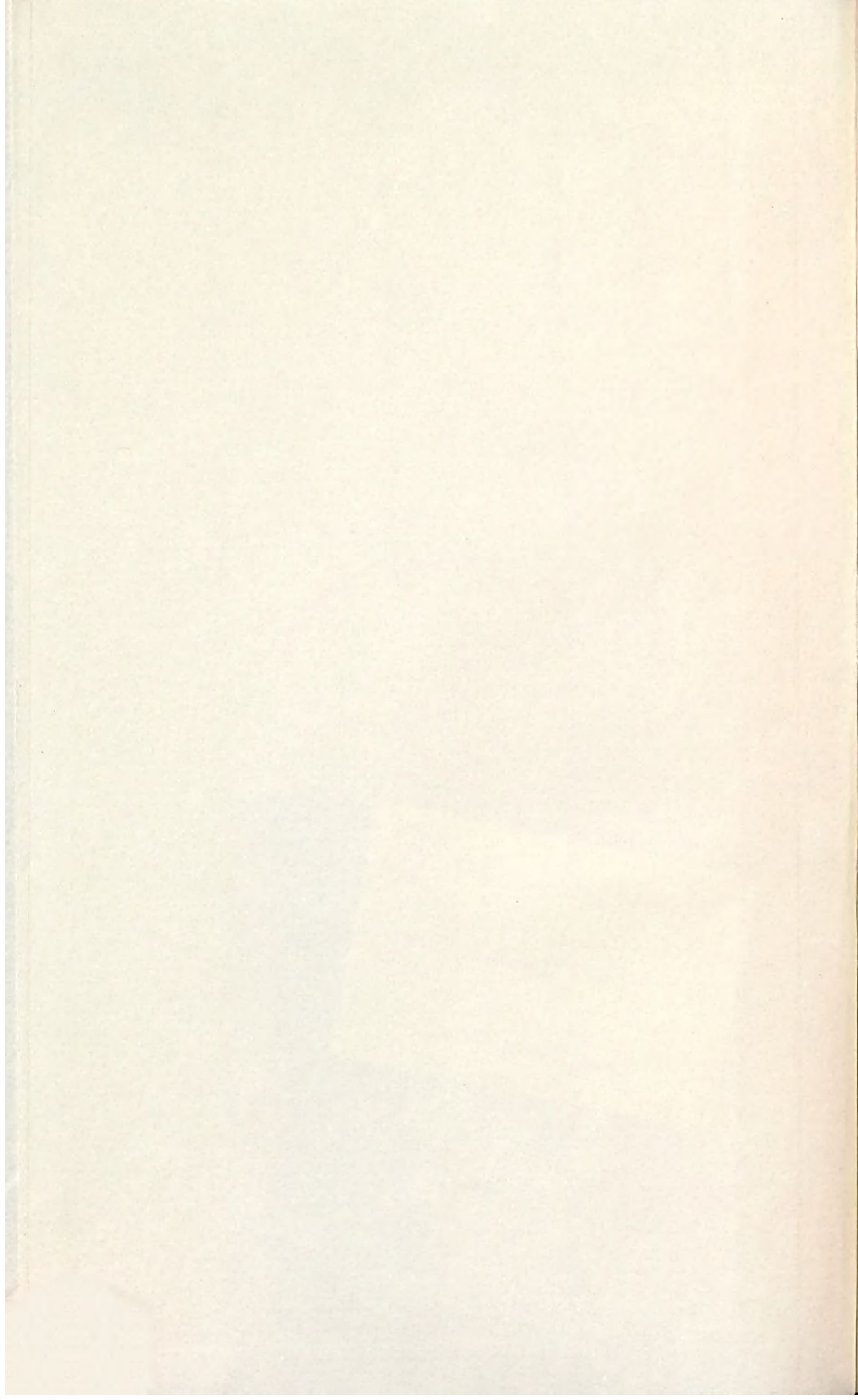
Phys. sp. 453 ch

<36632253280013

S

<36632253280013

Bayer. Staatsbibliothek



DIE
ELEKTRIZITÄT

IN
ELEMENTARER BEHANDLUNG.

VON
JAMES CLERK MAXWELL, M. A.

HERAUSGEGEBEN
VON
WILLIAM GARNETT, M. A.

INS DEUTSCHE ÜBERTRAGEN
VON
DR. L. GRAETZ.

MIT IN DEN TEXT EINGEDRUCKTEN HOLZSTICHEN.

BRAUNSCHWEIG,
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.

1883.

382 H

ANKÜNDIGUNG.

Maxwell, der leider zu früh gestorbene berühmte englische Physiker, entwickelt in diesem Werke die Hauptbegriffe und That-
sachen der Elektrizitätslehre in vollkommen strenger und scharfer
Weise auf elementarem Wege, d. h. ohne Anwendung der höheren
Mathematik. Während das grofse Werk Maxwells für Leser von
vorgerückten Kenntnissen bestimmt und auch für diese noch stellen-
weise sehr schwierig ist, wendet sich dieses Werk mehr an die An-
fänger, welchen es klare Begriffe und richtige Vorstellungen von der
Elektrizität bieten und die es insbesondere auf eine mechanische Auf-
fassung der Elektrizität hinleiten will. Dafs das Buch auch dem
Physiker von Fach nicht nur durch die Art der Darstellung, sondern
auch inhaltlich des Interessanten und Belehrenden genug bietet, bedarf,
da es von Maxwell herrührt, keiner weiteren Erwähnung.

DIE
ELEKTRIZITÄT
IN
ELEMENTARER BEHANDLUNG.

Phys. sp. 453 ch

DIE
ELEKTRIZITÄT
IN
ELEMENTARER BEHANDLUNG.

VON
JAMES CLERK MAXWELL, M. A.

HERAUSGEGEBEN
VON
WILLIAM GARNETT, M. A.

INS DEUTSCHE ÜBERTRAGEN
VON
DR. L. GRAETZ.

MIT IN DEN TEXT EINGEDRUCKTEN HOLZSTICHEN.

BRAUNSCHWEIG,
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.

1883.

Alle Rechte vorbehalten.



VORWORT DES ÜBERSETZERS.

Das vorliegende posthume Werk Maxwells, welches die Hauptthatsachen und Anschauungen der Elektrizitätstheorie elementar in einer Weise entwickelt, welche die mechanische Auffassung der Elektrizität möglichst anbahnt, wurde vor ungefähr sieben Jahren zum größten Teil geschrieben. Elektromagnetismus, Elektrodynamik und Induktion sind darin nicht behandelt. Der Herausgeber des englischen Originals W. Garnett M. A. hat aus Pietät gegen Maxwell nur einige Lücken aus Eigenem ergänzt, dagegen eine Reihe von Artikeln aus dem großen Werke Maxwells: „Treatise on Electricity and Magnetism“ zur Vervollständigung an passenden Stellen eingereiht, so daß das Ganze vollständig von Maxwell herrührt. Die aus dem großen Werke entnommenen Artikel sind im Inhaltsverzeichnis durch einen Stern bezeichnet. Von dem Vorwort Maxwells hat sich nur das umstehende Bruchstück vorgefunden.

BRUCHSTÜCK
AUS
DEM VORWORT MAXWELLS.

Der Plan des vorliegenden Werkes ist ein anderer, als der meines gröfseren Werkes über Elektrizität und Magnetismus. In dem grofsen Werke wird vorausgesetzt, dafs der Leser mit den höheren mathematischen Methoden vertraut ist, und dort wird sein Studium so geleitet, dafs er sich mathematisch mit den verschiedenen Erscheinungen der Disziplin beschäftigen kann. Diese Methoden werden hier nicht gebraucht. In diesem kürzeren Werke habe ich mich bemüht, in möglichst knapper Form diejenigen Erscheinungen anzuführen, welche auf die Theorie der Elektrizität Licht werfen und sie dazu zu verwenden, um Vorstellungen über das Wesen der Elektrizität im Geiste des Lesers zu entwickeln.

In dem gröfseren Werke habe ich zuweilen Methoden benutzt, welche vielleicht nicht die besten sind, aber ohne welche der Lernende nicht den Untersuchungen der Begründer der mathematischen Elektrizitätstheorie folgen kann. Seitdem habe ich mich mehr von der Überlegenheit der Methoden überzeugt, die von Faraday angewendet wurden, und habe sie daher von Anfang an benutzt.

In den ersten beiden Kapiteln werden Experimente beschrieben, die die Hauptthatsachen über elektrische Ladung beweisen, insofern diese Ladung eine der Messung zugängliche Gröfse ist.

Das dritte Kapitel „Über elektrische Arbeit und Energie“ besteht aus Folgerungen aus diesen Thatsachen. Für diejenigen,

welche einige Kenntniss der elementaren Teile der Mathematik besitzen, wird dieses Kapitel von Nutzen sein, da es ihre Kenntnisse schärfer zu machen sich bestrebt. Diejenigen, welche nicht so weit vorbereitet sind, können bei der ersten Lektüre des Buches dieses Kapitel auslassen.

Das vierte Kapitel beschreibt das elektrische Feld, oder das Gebiet, in welchem die elektrischen Erscheinungen sich zeigen.

INHALTSVERZEICHNIS.

Erstes Kapitel.

	Seite
1. Experiment I. Elektrisierung durch Reibung	1
2. „ II. Elektrisierung eines Leiters	2
3. „ III. Positive und negative Elektrisierung	4
4. „ IV. Elektrophor	5
5. Elektromotorische Kraft	5
6. Potential	6
7. Potential eines Leiters	7
8. Potential zweier sich berührender Metalle	7
9. Flächen gleichen Potentials	7
10. Potential, Druck und Temperatur	8
11. Experiment V. Goldblattelektroskop	9
12. „ V. Goldblattelektroskop. — Fortsetzung	11
13. Quadrantelektrometer	12
14. Idio- und Heterostatische Instrumente	13
15. Isolatoren	14
16. Apparate	15

Zweites Kapitel.

Über die Ladungen elektrisirter Körper.

17. Experiment VI. Ein elektrischer Körper in einem geschlossenen Gefäße	16
18. Experiment VII. Vergleichung der Ladungen zweier Körper . . .	17
19. „ VIII. Die Elektrisierung der Innenseite eines geschlossenen Gefäßes ist gleich und entgegengesetzt der des eingeschlossenen Körpers	18
20. Experiment IX. Einen Körper vollständig zu entladen	18
21. „ X. Einem Körper ein gegebenes Vielfaches einer Ladung mitzuteilen	19
22. Fünf Gesetze der elektrischen Erscheinungen	20

	Seite
I. In isolierten Körpern	20
II. In einem System von Körpern bei Leitung	20
III. In einem System von Körpern bei Elektrisierung	20
IV. Die Elektrizitätsmengen auf den beiden Elektroden eines Dielektrikums sind gleich und entgegengesetzt	20
V. Auf der inneren Oberfläche eines leitenden Gefäßes ist keine Elektrizität vorhanden	21

Drittes Kapitel.

Über elektrische Arbeit und Energie.

23. Definitionen von Arbeit, Energie, von einem konservativen System	22
24. Prinzip der Erhaltung der Energie, Beispiele für die Messung der Arbeit	23
25. Definition des elektrischen Potentials	23
26. Zusammenhang zwischen elektromotorischer Kraft und Flächen glei- chen Potentials	24
27. Indikatordiagramm der elektrischen Arbeit	25
28. Indikatordiagramm der elektrischen Arbeit. — Fortsetzung	26
29. Superposition elektrischer Wirkungen	27
30. Ladungen und Potentiale eines Systems von Leitern	27
31. Energie eines Systems von elektrischen Körpern	28
32. Die zum Übergange von einem elektrischen Zustande zu einem an- deren aufgewendete Arbeit	29
33. $P = \frac{dQ}{dE}$	30
34. $\Sigma(E'P) = \Sigma(E'P)$. — Greens Theorem	30
35. Zunahme der Energie bei Zunahme der Potentiale	31
36. $E = \frac{dQ}{dP}$	31
37. Reciprocität der Potentiale	32
38. Reciprocität der Ladungen	33
39. Greens Satz über Potentiale und Ladungen	33
40. Mechanische Arbeit bei der Verschiebung eines isolierten Systems .	35
41. Mechanische Arbeit bei der Verschiebung eines Systems, dessen Po- tentiale konstant erhalten werden	35

Viertes Kapitel.

Das elektrische Feld.

42. Zwei Leiter getrennt durch ein isolierendes Medium	37
43. Dieses Medium wird ein dielektrisches Medium oder das elektrische Feld genannt	37

Untersuchung des elektrischen Feldes.

44. Experiment XI. Mittels eines kleinen elektrischen Körpers	38
45. „ XII. Mittels zweier Scheiben	39
46. Elektrische Spannung	40
47. Experiment XIII. Coulombs Probescheibchen	41

	Seite
48. Experiment XIV. Elektromotorische Kraft an einem Punkte . . .	42
49. „ XV. Potential an einem Punkte in dem Felde. Zwei Kugeln	43
50. „ XVI. Eine Kugel	43
51. Flächen gleichen Potentials	44
52. Umgekehrte Methode. Experiment XVII	44
53. Experiment XVIII. Methode, die auf Art. V basiert ist	45
54. Elektrische Kraftlinien	46

Fünftes Kapitel.

Faradays Gesetz der Induktionslinien.

55. Faradays Gesetz	47
56. Hohles Gefäß	47
57. Kraftlinien	48
58. Eigenschaften eines Induktionsfadens	48
59. Eigenschaften eines Induktionsfadens. — Fortsetzung	49
60. Zellen	49
61. Energie	50
62. Verschiebung	52
63. Spannung	52
64. Analogieen	53
65. Analogieen. — Fortsetzung	55
66. Beschränkung	56
67. Faradays Würfel	56
68. Faradays Würfel. — Fortsetzung	56
69. Strom	57
70. Verschiebung	58
71. Theoreme	59
72. Induktion und Kraft	59
73. $+$ und $-$ Enden	60
74. Ungeschlossene Fäden	60
75. Die Innenseite eines hohlen leitenden Gefäßes, das keinen elektrischen Körper enthält, hat konstantes Potential und keine freie Elektrizität	60
76. Die Innenseite eines hohlen leitenden Gefäßes, das keinen elektrischen Körper enthält, hat konstantes Potential und keine freie Elektrizität. — Fortsetzung	60
77. Superposition	61
78. Thomsons Satz	61
79. Beispiel	62
80. Induzierte Elektrizität erster und zweiter Art	62

Sechstes Kapitel.

Spezielle Fälle der Elektrizitätsverteilung.

81. Konzentrische Kugeln	65
82. Elektrizitätseinheit. Gesetz der Kraft	66
83. Elektromotorische Kraft an einem Punkte	67
84. Definition von elektromotorischer Kraft	67

	Seite
85. Coulombs Gesetz	67
86. Wert des Potentials, das von einer gleichförmig elektrisierten Kugel herrührt	68
87. Kapazität der Kugel	71
88. Zwei konzentrische Kugelflächen. Leydener Flasche	72
89. Zwei parallele Ebenen	73
90. Kraft zwischen Ebenen	74
91. Thomsons Plattenelektrometer	75
92. Inverses Problem der Elektrostatik	75
93. Niveauflächen und Kraftlinien für Ladungen von 20 und 5 Einheiten. (Tafel I)	77
94. Niveauflächen und Kraftlinien für entgegengesetzte Ladungen im Verhältnis von 4 zu —1. (Tafel II)	78
95. Niveauflächen und Kraftlinien für einen elektrischen Punkt in einem Felde konstanter Kraft. (Tafel III)	79
96. Niveauflächen und Kraftlinien für Ladungen von drei elektrischen Punkten. (Tafel IV)	79
97. Faradays Gebrauch des Begriffes Kraftlinien	80
98. Methode bei der Zeichnung der Figuren	81

Siebentes Kapitel.

Elektrische Bilder.

99. Einleitung	85
100. Vorstellung eines Bildes, hergenommen aus der Optik	85
101. Elektrisches Bild im Mittelpunkt der Kugel	86
102. Äußerer Punkt und Kugel	88
103. Zwei Kugeln	89
104. Berechnung der Potentiale, wenn die Ladungen gegeben sind . .	91
105. Oberflächendichtigkeit auf einer Kugel, die durch einen äußeren Punkt induziert ist	91
106. Oberflächendichtigkeit auf zwei Kugeln und Bedingung für eine neutrale Linie	93

Achstes Kapitel.

Kapazität.

107. Kapazität eines Kondensators	95
108. Coëffizienten von Kondensatoren	96
109. Vergleich zweier Kondensatoren	97
110. Thomsons Methode mit vier Kondensatoren	97
111. Bedingung für die Nullwirkung	99

Neuntes Kapitel.

Elektrischer Strom.

112. Überführungsstrom mit einer Markkugel	102
113. Leitungsstrom in einem Drahte	103

	Seite
Unkenntnis über die Geschwindigkeit der Elektrizität in dem Strome	103
114. Verrückung und Entladung	104
115. Einteilung der Körper, durch welche die Elektrizität hindurchgeht	
Definition von Leiter, Elektroden, Anode und Kathode	105
Äußere elektromotorische Kraft	105
Metalle, Elektrolyte und Dielektrika	105
1. Metalle.	
116. Ohmsches Gesetz	105
117. Erzeugung von Wärme	106
2. Elektrolyte.	
118. Anion und Kation	106
Elektrochemische Äquivalente	106
119. Faradays Gesetze	107
Die zur vollständigen Elektrolyse erforderliche Kraft	107
120. Polarisation	108
121. Experimente von Helmholtz	108
122. Die vermutete Ungenauigkeit des Faradayschen Gesetzes ist nicht bestätigt	109
123. Messung des Widerstandes	110
Das Ohmsche Gesetz ist für Elektrolyte giltig	110
124. Theorie von Clausius	110
125. Theorie von Clausius. — Fortsetzung	111
126. Geschwindigkeit der Ionen	112
127. Molekulare Leitungsfähigkeit eines Elektrolyten	112
128. Experimente von Kohlrausch	112
129. Sekundäre Wirkungen	114
3. Dielektrika.	
130. Verschiebung	115
131. Dielektrische Kapazität von festen Körpern, einschließlic der Krystalle	115
132. Dielektrische Kapazität von festen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen	116
133. Disruptive Entladung. Mechanische und elektrische Analogieen .	118
Absolute Festigkeit. Brüchigkeit	118
134. Rückstandsladung	119
135. Mechanische Erläuterung	119
136. Elektrische Festigkeit von Gasen	121
137. Gase als Isolatoren	122
138. Experiment	122
139. Quecksilber- und Natriumdampf	123
140. Kinetische Theorie der Gase	124
141. Elektrische Eigenschaften des Turmalins	125
142. Elektrisches Glimmlicht	126
143. Elektrische Mühle	127

	Seite
Elektrisierte Luft	127
Die Bewegung von Gewitterwolken kommt nicht von der Elek- trizität her	127
144. Das Vorhandensein von elektrisierter Luft zu entdecken	128
145. Unterschied zwischen positiver und negativer Elektrizität	128
146. Entladung eines durch Induktion elektrisierten Leiters durch eine Spitze	128
147. Das elektrische Büschellicht	129
148. Der elektrische Funke	129
149. Spektroskopische Untersuchung	130
150*. Beschreibung der Voltaschen Batterie	131
151*. Elektromotorische Kraft	131
152*. Erzeugung eines stationären Stromes	132
153*. Magnetische Wirkung des Stromes	132
154*. Das Galvanometer	133
155*. Lineare Leiter	133
156*. Das Ohmsche Gesetz	134
157*. Lineare Leiter hintereinander geschaltet	135
158*. Lineare verzweigte Leiter	136
Kirchhoffs Gesetze	136
159. Widerstand eines Leiters von gleichförmigem Querschnitt	137

Zehntes Kapitel.

Erscheinungen bei einem elektrischen Strome, der durch hetero- gene Media fließt.

160. Seebecks Entdeckung	138
161. Gesetz von Magnus	139
162. Thermoelektrisches Diagramm und Definition von thermoelektri- scher Kraft	140
163. Die elektromotorische Kraft wird durch eine Fläche in dem Dia- gramm gemessen	141
164. Cummings Entdeckung	142
165. Thermische Wirkungen des Stromes	142
166. Peltiersche Wirkung	143
167. Thomsonsche Wirkung	143
168. Thomsons Analogie mit einer Flüssigkeit in einer Röhre	144
169. Experimente von Le Roux	144
170. Darstellung des Peltierschen und Thomsonschen Effektes	145
171. Die an der Verbindungsstelle erzeugte Wärmemenge hängt von ihrer Temperatur ab	145
172. Anwendung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärme- theorie	146
173. Vollständige Erläuterung des Diagramms	146
174. Entropie in der mechanischen Wärmetheorie	147
175. Elektrische Entropie	147
176. Definition von Entropie	148
177. Elektrische Entropie ist so viel wie thermoelektrische Kraft	148
178. Thermoelektrisches Diagramm	149

	Seite
179. Spezifische Wärme der Elektrizität	150
180. Unterschied zwischen Eisen und Kupfer	150
181. Vollständige Erläuterung des Diagramms	151
182. Thomsons Methode, die elektromotorische Kraft an einem Punkte des Stromkreises zu finden	152
183. Bestimmung des Sitzes der elektromotorischen Kraft	153
184. Elektromotorische Kraft zwischen Metallen und Elektrolyten . . .	153
185. Elektrolyse. Abscheidung des Metalls. Auflösung des Metalls . .	154
186. Die an der Anode oder Kathode erzeugte oder absorbierte Wärme- menge	155
187. Über die Erhaltung der Energie bei der Elektrolyse	157
188. Experimente von Joule	157
189. Verlust von Wärme, wenn der Strom äussere Arbeit leistet . . .	158
190. Elektromotorische Kraft eines elektrochemischen Vorganges . . .	158
191. Umkehrbare und nicht umkehrbare Wirkungen	159
192. Beispiel aus der Elektrolyse des Silberchlorids	159
193. Über konstante Voltasche Elemente. Daniellsches Element .	161

Elftes Kapitel.

Methoden, um einen elektrischen Strom dauernd zu erhalten.

194. Aufzählung der Methoden	166
195. Die Reibungselektrisiermaschine	166
196. Von welchen Verhältnissen der Strom abhängt. Anwendung von Seidenhüllen	167
197*. Erzeugung von Elektrizität durch mechanische Arbeit. Nicholson Revolving Doubler	169
198*. Prinzip von Varleys und Thomsons Elektrisiermaschinen . .	169
199*. Thomsons Wassertropfenapparat	172
200*. Holtzsche Elektrisiermaschine	173
201*. Theorie der Regeneratoren bei Elektrisiermaschinen	174
202*. Coulombs Torsionswage zur Messung von Ladungen	176
203*. Elektrometer zur Messung von Potentialen. Die Elektrometer von Snow Harris und Thomson	179
204*. Prinzip des Schutzrings. Thomsons absolutes Elektrometer . .	180
205*. Heterostatische Methode	183
206*. Messung des elektrischen Potentials eines kleinen Körpers . . .	185
207*. Messung des Potentials an einem Punkte der Luft	186
208*. Messung des Potentials eines Leiters, ohne ihn zu berühren . . .	187

Zwölftes Kapitel.

Über die Messung des elektrischen Widerstandes.

209*. Vorteile der Anwendung von praktischen Widerstandsnormalen bei elektrischen Messungen	189
210*. Verschiedene Normalwiderstände, die früher benutzt, und verschie- dene Systeme, die früher vorgeschlagen wurden	190
211*. Das elektromagnetische System der Einheiten	190
212*. Webers Einheit und die Einheit der British Association oder das Ohm	190

	Seite
213*. Angenommener Wert des Ohms 10 000 000 m in der Sekunde . . .	190
214*. Reproduktion von Normalen	191
215*. Form der Widerstandsrollen	192
216*. Rollen von großem Widerstande	193
217*. Hintereinanderschaltung von Rollen	194
218*. Nebeneinanderschaltung von Rollen	194
219*. Über die Vergleichung von Widerständen. 1) Ohms Methode . .	195
220*. 2) Mit dem Differentialgalvanometer	196
221*. 3) Mit der Wheatstoneschen Brücke	200
222*. Schätzung der Fehlergrenzen bei der Bestimmung	201
223*. Beste Anordnung der zu vergleichenden Leiter	202
224*. Über den Gebrauch der Wheatstoneschen Brücke	204
225*. Thomsons Methode für die Bestimmung des Widerstandes eines Galvanometers	206
226*. Mancés Methode zur Bestimmung des Widerstandes einer Batterie	207
227*. Vergleichung von elektromotorischen Kräften	209

Dreizehntes Kapitel.

Über den elektrischen Widerstand von Stoffen.

228*. Metalle, Elektrolyte und Dielektrika	212
229*. Widerstand von Metallen	213
230*. Tabelle für den Widerstand von Metallen	214
231*. Widerstand von Elektrolyten	215
232*. Experimente von Paalzow	216
233*. Experimente von Kohlrausch und Nippoldt	217
234*. Widerstand der Dielektrika	218
235*. Guttapercha	219
236*. Glas	220
237*. Gase	220
238*. Experimente von Wiedemann und Rühlmann	221
Anmerkung über die Bestimmung der Stromstärke in dem Gal- vanometer der Wheatstoneschen Brücke	221

Erstes Kapitel.

Experiment I.

Elektrisierung durch Reibung.

1. Man nehme eine Stange Siegellack, reibe sie mit einem Wollentuch oder mit Flanell und bringe sie dann in die Nähe von Papierschnitzeln, die man auf den Tisch gestreut hat. Die Papierschnitzel werden in Bewegung kommen, die leichteren werden sich an einem Ende in die Höhe richten und einige werden zu dem Siegellack hinauffliegen. Diejenigen, welche an die Siegellackstange hinangeflogen sind, bleiben manchmal eine Zeitlang an ihr hängen, und fliegen dann wieder plötzlich fort. Man ersieht daraus, daß in dem Raume zwischen dem Siegellack und dem Tische ein Gebiet vorhanden ist, in welchem kleine Körper, wie Papierschnitzel, von gewissen Kräften angegriffen werden, von Kräften, welche bewirken, dass diese Körper besondere Lagen annehmen und sich bald von dem Tische zum Siegellack, bald von dem Siegellack zum Tische hinbewegen.

Diese Erscheinungen, und andere, welche mit diesen zusammenhängen, nennt man elektrische Erscheinungen; die Körper, zwischen welchen die Kräfte sich zeigen, nennt man elektrisiert, und den Raum, in welchem diese Erscheinungen stattfinden, bezeichnet man als elektrisches Feld.

An Stelle des Siegellackes kann man andere Substanzen anwenden. Ein Stück Ebonit, Guttapercha, Harz oder Schellack bringen dieselben Erscheinungen hervor und ebenso Bernstein, diejenige Substanz, an welcher diese Erscheinungen zuerst beobachtet wurden, und von deren griechischer Bezeichnung das Wort elektrisch abgeleitet ist.

Auch die Stoffe, mit welchen man diese Körper reibt, kann man variieren, und man hat gefunden, daß Katzenpelz sie noch besser erregt als Flanell.

Ferner hat man gefunden, daß bei diesem Experimente nur diejenigen Teile der Oberfläche des Siegellackes diese Erscheinungen zeigen, welche wirklich gerieben worden waren und daß manche Teile der geriebenen Oberfläche augenscheinlich wirksamer sind als andere. In der That hängt die Verteilung der Elektrisierung über die Oberfläche ab von der ganzen Vorgeschichte des Siegellackes und zwar in so komplizierter Art und Weise, daß es sehr schwer sein würde, dies zu erforschen. Es gibt indes andere Körper, welche elektrisiert werden können und auf welchen die Elektrisierung immer in bestimmter Weise verteilt ist. Wir ziehen es daher vor, bei unseren Experimenten solche Körper anzuwenden.

Die Thatsache, daß gewisse Körper, nachdem sie gerieben worden, andere Körper anzuziehen scheinen, war schon den Alten bekannt. In der neueren Zeit hat man eine Reihe anderer Erscheinungen beobachtet, und gefunden, daß sie mit diesen Erscheinungen der Anziehung in Verbindung stehen. Diese wurden unter dem Namen „elektrische“ Erscheinungen zusammengefaßt, da der Bernstein, ἤλεκτρον, die Substanz war, an welchem sie zuerst beschrieben wurden.

Von anderen Körpern, besonders von dem Magneteisenstein und von Stücken Eisen und Stahl, welche gewissen Prozessen unterworfen wurden, ist es auch lange bekannt, daß sie Erscheinungen einer Wirkung in die Ferne zeigen. Diese Erscheinungen jedoch und andere, welche mit ihnen zusammenhängen, sind verschieden von den elektrischen Phänomenen und wurden unter dem Namen „magnetische Erscheinungen“ klassifiziert, da der Magneteisenstein, μάγνης, in Magnesia gefunden wurde ¹⁾.

Diese beiden Klassen von Erscheinungen hängen, wie man seitdem fand, miteinander zusammen und die Beziehungen zwischen den mannigfaltigen Erscheinungen beider Klassen, so weit sie bekannt sind, bilden die Lehre vom Elektromagnetismus.

Experiment II.

Elektrisierung eines Leiters.

2. Man nehme eine beliebige Metallplatte (ein Theebrett, die obere Seite nach unten gekehrt, ist für diesen Zweck passend) und

¹⁾ Der Name Magnesia wurde zwei Distrikten gegeben, einem in Lydien, einem in Thessalien. Beide scheinen durch ihre Mineralprodukte berühmt gewesen zu sein und außer der Substanz, welche die modernen Chemiker unter dem Namen Magnesia kennen, waren noch verschiedene Substanzen unter diesem Namen bekannt. Magneteisenstein, Hornschiefer, Meerschäum scheinen indes hauptsächlich die Substanzen gewesen zu sein, welche man magnesisch oder magnetisch nannte, und im allgemeinen versteht man darunter lydische Steine.

lege sie auf drei trockene Weingläser. Dann lege man eine Platte von Ebonit auf den Tisch, oder eine Platte von dünnem Guttapercha oder ein gut getrocknetes Blatt Löschpapier. Man reibe dies leicht mit Pelz oder Flanell, hebe es an den Ecken vom Tische auf und lege es auf die umgekehrte Theeplatte, indem man Acht gibt, die Platte nicht mit den Fingern zu berühren.

Man wird finden, daß die Platte jetzt elektrisiert ist. Papierschnitzel oder Goldblättchen, die man unter dieselbe bringt, werden zu ihr hinauffliegen und wenn man mit einem Fingergelenk einer Ecke der Platte nahe kommt, so wird ein Funke zwischen der Platte und dem Gelenke übergehen, man wird ein eigentümliches Gefühl empfinden und die Platte wird dann nicht mehr elektrische Erscheinungen zeigen. Man nennt sie dann entladen. Wenn man einen Metallstab in der Hand hält und diesen nahe an die Platte bringt, so werden die Erscheinungen nahezu dieselben sein, aber die Empfindung wird eine etwas andere sein.

Wenn man dagegen statt eines Metallstabes oder Metalldrahtes einen Glasstab oder eine Stange Siegellack oder ein Stück Guttapercha in der Hand hält und dieses an die Platte heranbringt, so wird kein Funke, keine Empfindung, keine Entladung zu merken sein. Die Entladung geht also vor sich durch Metalle und durch den menschlichen Körper, aber nicht durch Glas, Siegellack oder Guttapercha. Man kann daher die Körper in zwei Klassen einteilen: in Leiter, d. h. solche, welche die Entladung durchlassen, und in Nichtleiter, durch welche eine Entladung nicht stattfindet.

Bei elektrischen Experimenten müssen wir diejenigen Leiter, deren Ladung wir konstant halten wollen, durch nicht leitende Stoffe tragen lassen. Bei dem eben angeführten Experimente hatten wir die Platte auf Weingläser gelegt, um zu verhüten, daß sie entladen würde. Man kann Stäbe von Glas, Ebonit oder Guttapercha als Stützen anwenden, oder man kann auch den Leiter an einem Faden von weißer Seide aufhängen. Feste Nichtleiter nennt man, wenn man sie zu solchem Zwecke benutzt, Isolatoren. Kupferdrähte werden oft mit Seide umwickelt, zuweilen in eine Hülle von Guttapercha gesteckt, um zu verhüten, daß sie in elektrische Verbindung mit anderen Körpern kommen. Man nennt sie dann isoliert.

Die Metalle sind gute Leiter; Luft, Glas, Harze, Guttapercha, Kautschuk, Ebonit, Paraffin u. s. w. sind gute Isolatoren; aber alle Substanzen leisten, wie wir später sehen werden, dem Durchgange der Elektrizität Widerstand und alle Substanzen lassen sie durchgehen, obwohl in außerordentlich verschiedenem Maße. Vorläufig wollen wir nur zwei Klassen von Körpern betrachten, gute Leiter und gute Isolatoren.

Experiment III.

Positive und negative Elektrisierung.

3. Man nehme eine andere Platte und isoliere sie ebenso wie früher; dann entlade man die erste Platte, nehme das elektrisierte Blatt von ihr fort und lege es auf die zweite Platte. Man wird finden, daß jetzt beide Platten elektrisch sind. Wenn man ein Kügelchen aus Hollundermark an einem weißen Seidenfaden ¹⁾ aufhängt und es zur Berührung mit der ersten Platte bringt, so wird es sofort von dieser abgestoßen, dagegen von der zweiten Platte angezogen werden. Läßt man es nun die zweite Platte berühren, so wird es von dieser abgestoßen, aber von der ersten angezogen werden. Die Elektrisierungen der beiden Platten sind also von entgegengesetzter Art, da die eine immer das anzieht, was die andere abstößt. Bringt man einen Metalldraht, den man an einen Ebonitstab befestigt hat, zugleich mit beiden Platten in Berührung, so werden beide Platten vollständig entladen. Nimmt man zwei Hollundermarkkügelchen, dann findet man, daß, wenn beide dieselbe Platte berührt haben und nachher nahe aneinander aufgehängt werden, sie sich abstoßen, wenn sie aber verschiedene Platten berührt haben, sie sich anziehen. Daraus ersieht man, daß Körper, die auf dieselbe Art elektrisiert sind, einander abstoßen und daß Körper, die auf entgegengesetzte Art elektrisiert sind, einander anziehen.

Wenn wir die eine Art der Elektrisierung dadurch kennzeichnen, daß wir sie positiv nennen, müssen wir die andere Art als negativ bezeichnen. Wir haben keinen physikalischen Grund dafür, die Bezeichnung positiv gerade der einen Art der Elektrisierung beizulegen und nicht der andern. Indes sind alle Physiker darin einig, daß sie diejenige Art von Elektrisierung positiv nennen, welche die Oberfläche von frisch geputztem Glase aufweist, wenn sie mit Zinkamalgam, das auf Leder aufgestrichen ist, gerieben wird. Das ist rein Sache des Übereinkommens, aber das Übereinkommen ist nützlich, wenn man nur bedenkt, daß es ein ebenso beliebiges Übereinkommen ist, wie dasjenige, welches man bei den Figuren in der analytischen Geometrie anwendet, wo man horizontale Strecken positiv oder negativ nennt, je nachdem sie vom Anfangspunkte aus nach rechts oder links gemessen werden.

Bei unserm Experimente mit der durch Flanell erregten Gutta-perchascheibe ist die Elektrizität der Scheibe und der Metallplatte,

¹⁾ Ich finde es zweckmäßig, das andere Ende des Fadens an einen Ebonitstab von ungefähr 3 mm Durchmesser zu befestigen. Ebonit ist ein viel besserer Isolator als der Seidenfaden, besonders bei feuchtem Wetter.

auf welche sie gelegt ist, negativ; die des Flanelles und der andern Metallplatte, von welcher das Guttapercha abgehoben wurde, positiv.

Auf welche Weise man auch Elektrizität erzeugt, immer gehört sie zu der einen oder der andern dieser beiden Arten.

Experiment IV.

Der Voltasche Elektrophor.

4. Dieses Instrument ist für elektrische Experimente sehr zweckmäßig und ist viel weniger umfangreich als irgend ein anderer, Elektrizität erzeugender Apparat. Der Elektrophor besteht aus zwei Platten und einer isolierenden Handhabe, welche an die Hinterseite der einen Platte befestigt werden kann. Eine dieser Platten besteht aus Harz oder Ebonit und liegt auf einer Metallunterlage fest auf. In der Mitte der Platte befindet sich ein Metallstift¹⁾, der mit der Metallunterlage in Verbindung ist und gerade bis an die Oberfläche des Ebonits reicht. Die Oberfläche des Ebonits wird durch Reiben mit Flanell oder Katzenfell elektrisch gemacht. Dann wird die andere Platte, welche ganz von Metall ist, mittels der isolierenden Handhabe der Ebonitscheibe genähert. Wenn sie bis in eine gewisse Entfernung von dem Metallstifte gekommen ist, springt ein Funke über, und wenn die Platten nun auseinander gebracht werden, so findet man die Metallplatte positiv geladen und die Ebonitplatte mit der Metallunterlage negativ.

Bei der Benutzung des Instrumentes hält man die eine der Platten in Verbindung mit einem Leiter, während man die andere abwechselnd an die erste Platte und an einen andern Leiter anlegt. Durch diesen Prozeß werden die beiden Leiter mit gleichen Quantitäten Elektrizität geladen, und zwar wird derjenige, welcher mit der Ebonitplatte in Verbindung war, negativ, während derjenige, an welchen die ganz metallene Platte angelegt wurde, positiv wird.

Elektromotorische Kraft.

5. Definition. Alles, was eine Fortführung der Elektrizität verursacht oder zu verursachen strebt, nennt man elektromotorische Kraft. Wenn z. B. zwei elektrisierte Leiter durch einen Draht verbunden werden, und wenn Elektrizität auf dem Drahte von dem einen zum andern Körper übergeführt wird, so wird das Streben nach diesem Übergange, welches vor der Anlegung des

¹⁾ Dieser Metallstift wurde von Professor Phillips angegeben, um der Notwendigkeit überhoben zu sein, die übertragende Scheibe zu berühren, während sie in Kontakt mit dem Ebonit ist.

Drahtes bestand und welches, wenn der Draht angelegt ist, diese Überführung hervorbringt, die elektromotorische Kraft von dem einen Körper zu dem andern hin auf dem durch den Draht bestimmten Wege genannt.

Um die elektromotorische Kraft von einem Punkte nach einem andern vollkommen zu definieren, ist es im allgemeinen notwendig, einen speziellen Weg von dem einen Punkte zu dem andern hin zu bestimmen, auf welchem die elektromotorische Kraft gerechnet werden soll. In manchen Fällen, von denen wir einige anführen werden, wenn wir zu elektrolytischen, thermoelektrischen und elektromagnetischen Erscheinungen kommen werden, kann die elektromotorische Kraft von einem Punkte nach einem andern hin auf verschiedenen Wegen verschieden sein. Beschränken wir indes unsere Aufmerksamkeit, wie wir es in diesem Teile unserer Untersuchung thun müssen, auf die Theorie des Gleichgewichts ruhender Elektrizität, so werden wir finden, daß die elektromotorische Kraft von einem Punkte nach einem andern für alle Wege, die man in der Luft von einem Punkte zum andern ziehen kann, dieselbe ist.

Elektrisches Potential.

6. Die elektromotorische Kraft von irgend einem Punkte auf einem in Luft gezogenen Wege nach einem bestimmten als Ausgangspunkt gewählten Punkte, nennt man das elektrische Potential des ersten Punktes.

Da elektrische Erscheinungen nur von Potentialdifferenzen abhängen, ist es ohne Bedeutung, welchen Ausgangspunkt wir als Nullpunkt des Potentials nehmen, wofern wir ihn nur während derselben Reihe von Messungen nicht ändern.

In mathematischen Untersuchungen nimmt man den Ausgangspunkt in unendlicher Entfernung von dem betrachteten elektrischen Systeme an. Der Vorteil dieser Annahme ist der, daß der mathematische Ausdruck für das Potential, das von einem kleinen elektrischen Körper herrührt, sich auf seine einfachste Form reduziert.

Bei experimentellen Arbeiten ist es zweckmäßiger, als Ausgangspunkt irgend einen Gegenstand zu nehmen, der mit der Erde in metallischer Verbindung steht, z. B. irgend einen Teil der metallischen Gas- oder Wasserleitungsröhren der Stadt.

Oft ist es erlaubt anzunehmen, daß Boden, Decke und Wände des Raumes, in welchem die Experimente angestellt werden, hinreichende Leitungsfähigkeit haben, um die ganze innere Oberfläche des Raumes auf dasselbe Potential zu bringen. Dieses Potential kann man dann als Potential Null annehmen. Wenn ein Instrument in ein

metallisches Gehäuse eingeschlossen ist, so kann man das Potential des Gehäuses als Potential Null annehmen.

Potential eines Leiters.

7. Wenn an verschiedenen Punkten eines homogenen Leiters die Potentiale verschieden sind, so wird ein elektrischer Strom von den Stellen höheren zu den Stellen niederen Potentials vorhanden sein. Die Theorie solcher Ströme werden wir später auseinandersetzen (Kap. IX). Vorläufig befassen wir uns mit den Fällen von elektrischem Gleichgewichte, bei dem Ströme nicht vorhanden sind. Daher muß in den Fällen, mit welchen wir es jetzt zu thun haben, das Potential an jedem Punkte des Leiters dasselbe sein. Dieses Potential nennt man das Potential des Leiters.

Das Potential eines Leiters wird gewöhnlich definiert als das Potential eines Punktes der Luft unendlich nahe an der Oberfläche des Leiters. Innerhalb einer fast geschlossenen Höhlung an dem Leiter ist das Potential in jedem Punkte der Luft dasselbe und wenn wir das Potential innerhalb einer solchen Höhlung experimentell bestimmen, entgehen wir der Schwierigkeit, uns mit Punkten unendlich nahe an der Oberfläche zu beschäftigen.

8. Man hat gefunden, daß, wenn zwei verschiedene Metalle in Berührung und in elektrischem Gleichgewichte sind, ihre auf diese Weise bestimmten Potentiale im allgemeinen verschieden sind. Wenn man z. B. einen Kupfercylinder und einen Zinkcylinder in Kontakt miteinander hält und wenn man dann erst den Kupfer- und dann den Zinkcylinder um die Flamme einer Spirituslampe herumhält, welche mit einem Elektrometer in Verbindung ist, so erhält die Lampe rasch das Potential der Luft innerhalb des Cylinders und das Elektrometer zeigt, daß das Potential der Luft in jedem Punkte innerhalb des Zinkcylinders höher ist, als das Potential der Luft innerhalb des Kupfercylinders. Auf diesen Gegenstand werden wir wieder zurückkommen; vor der Hand aber wollen wir, um Zweideutigkeiten zu vermeiden, annehmen, daß die Leiter, mit welchen wir es zu thun haben, alle aus demselben Metalle bestehen und auf derselben Temperatur sind, und daß das dielektrische Medium Luft ist.

9. Das Gebiet des Raumes, in welchem das Potential größer als ein bestimmter Wert ist, ist von dem Gebiete, in welchem es kleiner als dieser Wert ist, durch eine Fläche geschieden, die man eine Fläche gleichen Potentials nennt. An jedem Punkte auf ihr hat das Potential den gegebenen Wert.

Wir können uns eine Reihe von Flächen gleichen Potentials beschrieben denken, entsprechend einer Reihe von Potentialen in arith-

metischer Ordnung. Das Potential eines Punktes wird dann angegeben durch seine Lage in der Reihe der Flächen gleichen Potentials.

Je zwei verschiedene Flächen gleichen Potentials können sich nicht schneiden, denn kein Punkt kann zwei verschiedene Potentiale haben.

10. Der Begriff des elektrischen Potentials kann durch einen Vergleich mit dem Drucke in der Theorie der Flüssigkeiten und mit der Temperatur in der Theorie der Wärme erläutert werden.

Wenn zwei Gefäße, die dieselbe oder verschiedene Flüssigkeiten enthalten, durch ein Rohr in Kommunikation gesetzt werden, so wird die Flüssigkeit aus dem Gefäße, in welchem der Druck größer ist, in das andere, in welchem der Druck kleiner ist, hinüberfließen, bis der Druck ausgeglichen ist. Das wird aber nicht mehr der Fall sein, wenn das eine Gefäß höher steht als das andere; denn die Schwere hat das Bestreben, die Flüssigkeit von dem höheren zu dem niederen Gefäße überfließen zu lassen.

Ebenso wird bei zwei elektrischen Körpern, die durch einen Draht in elektrische Verbindung gesetzt sind, die Elektrizität von dem Körper mit höherem Potential zu dem mit niederem Potential übergeführt werden, falls nicht eine elektromotorische Kraft vorhanden ist, welche die Elektrizität von dem einen dieser Körper zum andern zu treiben strebt, wie in dem oben erwähnten Falle von Zink und Kupfer.

Ferner, wenn zwei Körper mit verschiedenen Temperaturen in thermische Verbindung gebracht werden, sei es durch wirkliche Berührung oder durch Strahlung, so wird die Wärme von dem Körper mit höherer Temperatur zu dem mit niederer Temperatur übergehen, bis die Temperatur beider Körper dieselbe ist.

Man darf nicht glauben, daß die Analogie zwischen Temperatur und Potential sich auf alle Erscheinungen der Wärme und Elektrizität erstreckt. In der That hört diese Analogie ganz auf, wenn man sie auf die Fälle anwendet, wo Wärme erzeugt oder zerstört wird.

Wir müssen auch in Betracht ziehen, daß der Begriff Temperatur einem wirklichen physikalischen Zustande entspricht, während das Potential eine rein mathematische Gröfse ist, deren Wert von dem Ausgangspunkte abhängt, welchen wir beliebig wählen können. Bringt man einen Körper auf eine hohe Temperatur, so kann er schmelzen oder verdampfen. Bringt man einen Körper zugleich mit dem ihn umgebenden Gefäße auf ein hohes Potential, so veranlasst das durchaus keine physikalische Wirkung auf den Körper. Unter den Erscheinungen der Elektrizität und der Wärme ist also das einzige, was wir als analog betrachten können, die Bedingung für den Übergang der Wärme und Elektrizität, je nachdem die Temperatur oder das Potential in dem einen Körper oder in dem andern höher ist.

Was die andere Analogie betrifft, — die zwischen Potential und Flüssigkeitsdruck —, so müssen wir bedenken, daß die einzige Ähn-

lichkeit der Elektrizität mit einer Flüssigkeit die ist, daß sie auf Leitern ebenso fließen kann wie eine Flüssigkeit in einer Röhre. Und hier können wir ein- für allemal den gebräuchlichen Ausdruck „das elektrische Fluidum“ einführen zu dem Zwecke, um unsere Leser vor ihm zu warnen. Das ist einer von den Ausdrücken, welcher einmal gebraucht wurde, um ein beobachtetes Faktum auszudrücken, und der sofort vom Publikum aufgefaßt wurde, als bezeichne er ein ganzes System von imaginären Kenntnissen. So lange wir noch nicht wissen, ob positive Elektrizität oder negative oder beide Substanz genannt werden müssen, oder Mangel an Substanz, und solange wir nicht wissen, ob die Geschwindigkeit eines elektrischen Stromes durch Hunderte oder Tausende von Meilen in einer Sekunde gemessen wird, oder durch den hundertsten Teil eines Zolles in einer Stunde, oder gar solange wir nicht wissen, ob der Strom vom Positiven zum Negativen fließt oder in entgegengesetzter Richtung, so lange müssen wir es vermeiden, von elektrischer Flüssigkeit zu sprechen.

Über Elektroskope.

11. Ein Elektroskop ist ein Instrument, mittels dessen das Vorhandensein des elektrischen Zustandes entdeckt werden kann. Alle Elektroskope sind im Stande, mit mehr oder weniger Genauigkeit nicht nur die Existenz des elektrischen Zustandes, sondern auch ihren Betrag anzuzeigen. Solche Anzeigen sind zwar manchmal sehr wertvoll, um den Experimentator zu leiten, indes darf man nicht annehmen, daß sie ein numerisches Maß der Elektrisierung bieten. Instrumente, die so eingerichtet sind, daß ihre Angaben Data für die numerische Messung elektrischer Quantitäten liefern, nennt man Elektrometer.

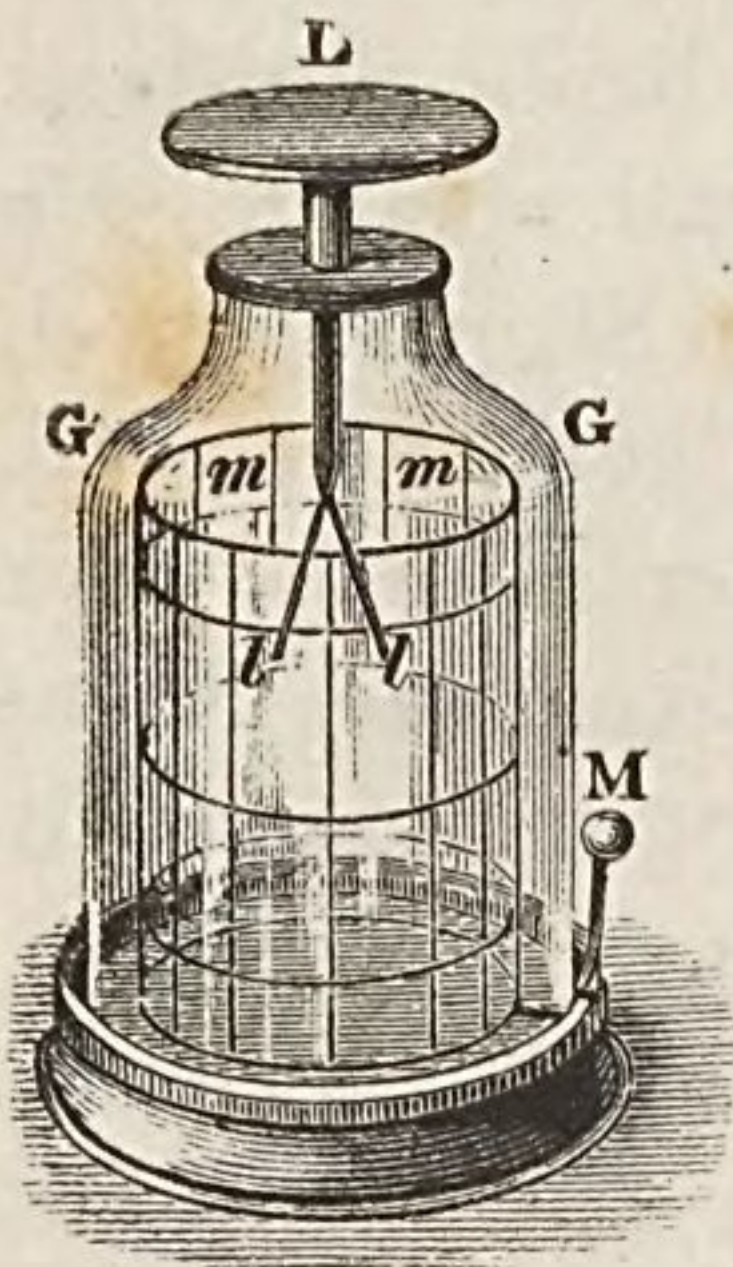
Ein Elektrometer kann natürlich als Elektroskop gebraucht werden, wenn es hinreichend empfindlich ist, um die in Frage stehende Elektrisierung anzuzeigen; und ein als Elektroskop bestimmtes Instrument kann, wenn seine Angaben hinreichend gleichmäßig und regelmäßig sind, als Elektrometer benutzt werden.

Die Klasse der Elektroskope von einfachster Form ist diejenige, bei welcher der Angaben machende Teil des Instrumentes aus zwei nebeneinander aufgehängten, leichten Körpern besteht, welche, wenn sie elektrisiert sind, sich gegenseitig abstoßen und ihre Elektrisierung durch ihre Trennung voneinander anzeigen.

Die aufgehängten Körper können sein Hollundermarkkugeln, vergoldet, und an feinen Leinenfäden aufgehängt (diese leiten besser als Seide oder Baumwolle), oder Strohalmstückchen, oder Streifen von Metall, und im letztern Falle kann man Zinnfolie oder Goldblatt als Metalle nehmen, dicker oder dünner, je nach dem zu messenden Betrage von Elektrizität.

Wir wollen annehmen, daß unser Elektroskop eins von der empfindlichsten Artist, bei welcher Goldblättchen angewendet werden (Fig. 1). Der anzeigende Apparat ll ist gewöhnlich an dem einen Ende eines Metallstabes L befestigt, welcher durch eine Öffnung in dem Deckel des Glasgefäßes G hindurchgeht. Der anzeigende Apparat hängt also innerhalb des Gefäßes und ist vor Luftströmungen geschützt,

Fig. 1.



welche eine Bewegung der aufgehängten Körper hervorbringen könnten, die man fälschlich als von Elektrizität herrührend halten könnte.

Um das Vorhandensein von Elektrizität auf einem Körper zu untersuchen, bringt man den Körper nahe an die Platte L am Ende des Metallstabes. Wenn die Elektrisierung stark genug ist, so divergieren dann die aufgehängten Körperchen.

Indessen ist das Glasgehäuse, wie Faraday zeigt, im Stande, selbst elektrisiert zu werden und wenn Glas elektrisch geworden ist, ist es sehr schwer, experimentell den Betrag und die Verteilung seiner Elektrisierung zu bestimmen. Es ist also dadurch eine neue Kraft in das Experiment eingeführt, deren Natur und Gröfse unbekannt ist und diese wirkt in demselben oder in entgegengesetztem Sinne wie die anderen Kräfte, welche auf die Goldblättchen wirken, so daß deren Divergenz nicht mehr als eine richtige Anzeige ihrer Elektrisierung gelten kann.

Die beste Methode, sich von dieser Unsicherheit frei zu machen, ist die, daß man in das Glasgehäuse ein Metallgefäß bringt, welches die Goldblättchen fast ganz umschließt und welches mit der Erde in Verbindung steht. Wenn die Goldblättchen elektrisiert werden, so wird allerdings die Innenwand dieses Gefäßes entgegengesetzt elektrisiert und dadurch die Divergenz der Goldblättchen vergrößert, aber die Verteilung dieser Elektrizität hängt genau ab von der der Goldblättchen, so daß die Divergenz der Goldblättchen doch den wirklichen elektrischen Zustand richtig anzeigt. Ein ganz aus Metall bestehendes Gefäß aber ist undurchsichtig, so daß man die Goldblättchen nicht von außen sehen kann. Man kann aber ein Drahtnetzgehäuse anwenden, und dies zeigt sich durchaus genügend, um die Goldblättchen vor der Wirkung des Glases zu schützen, während es ihre Sichtbarkeit nicht hindert.

Die Platte L und der obere Teil des Stabes, welcher die Goldblättchen trägt, ebenso wie ein anderes Stück Metall M , welches mit dem Gehäuse mm in Verbindung steht und aus dem Glasgefäße des Instrumentes herausgeführt wird, nennt man Elektroden, welcher Name von Faraday erfunden ist, um den Weg zu bezeichnen, auf welchem die Elektrizität zu den wesentlichen Teilen des Instrumentes gelangt.

Die Divergenz der Goldblättchen zeigt an, daß das Potential der Goldblättchen und ihrer Elektrode verschieden ist von dem des sie umgebenden Metallgehäuse und seiner Elektrode. Wenn die beiden Elektroden durch einen Draht verbunden werden, kann das ganze Instrument beliebig stark elektrisiert werden, ohne daß die Goldblättchen divergieren werden.

Experiment V.

Die Divergenz der Goldblättchen allein zeigt nicht an, ob ihr Potential größer ist oder kleiner als das des Gehäuses; sie zeigt nur, daß diese Potentiale verschieden sind. Um zu bestimmen, wo das höhere Potential ist, nehme man eine geriebene Stange Siegellack oder irgend eine andere Substanz, von der wir wissen, daß sie negativ elektrisch ist, und bringe sie nahe an die Elektrode, welche die Goldblättchen trägt. Sind die Goldblättchen negativ elektrisiert, so werden sie umsomehr auseinandergehen, je mehr man das Siegellack dem Stabe nähert, welcher sie trägt. Sind sie positiv elektrisiert, so werden sie zusammenzufallen streben. Ist die Elektrisierung des Siegellackes beträchtlich im Vergleich mit der der Goldblättchen, so werden diese erst ganz zusammenfallen, aber dann sich wieder öffnen, wenn das Siegellack näher gebracht wird, woraus man erkennt, daß sie nun negativ elektrisch sind. Wird die zum Gehäuse gehörende Elektrode *M* von der Erde isoliert und das Siegellack ihr genähert, so werden die Angaben gerade umgekehrt sein; sind die Goldblättchen positiv elektrisiert, so werden sie mehr divergieren, sind sie negativ elektrisiert, so werden sie zusammenzufallen streben.

Wenn der bei diesem Experimente angewendete prüfende Körper positiv elektrisiert ist, z. B. wenn man eine mit Amalgam geriebene Glasröhre benutzt, so sind die Angaben die entgegengesetzten.

Durch diese Methode ist es leicht zu bestimmen, ob die Goldblättchen positiv oder negativ elektrisiert sind, oder, mit anderen Worten, ob ihr Potential höher oder niedriger ist als das des Gehäuses.

12. Wenn die Elektrisierung der Goldblättchen eine erhebliche ist, so wird die elektrische Kraft, welche auf sie wirkt, viel größer als ihr Gewicht, und sie strecken sich, so weit sie können, zu dem Gehäuse hin. In dieser Lage bringt ein Zuwachs an Elektrizität keine sichtbare Wirkung auf das Elektroskop hervor, denn die Goldblättchen können nicht weiter divergieren. Wenn die Elektrisierung noch weiter vergrößert wird, kommt es oft vor, daß die Goldblättchen von ihrem Träger abgerissen werden, und das Instrument unbrauchbar wird. Daher ist es besser, wenn man mit hohen Graden von Elektrisierung zu thun hat, ein weniger empfindliches Instrument zu benutzen. Ein Paar Korkkügelchen an Leinenfäden aufgehängt, passen

sehr gut dazu. Die Fäden sind hinreichend als Leiter der Elektrizität und die Kügelchen werden von einander abgestoßen, wenn sie elektrisiert sind.

Für sehr kleine Potentialdifferenzen muß man viel empfindlichere Elektroskope als das gewöhnliche Goldblattelektroskop anwenden.

Thomsons Quadrant-Elektrometer.

13. In Sir William Thomsons Quadrant-Elektrometer besteht der anzeigende Teil aus einem dünnen, ebenen Streifen von Aluminium (s. Fig. 2), die Nadel genannt, welcher an einer vertikalen Achse von starkem Platindraht befestigt ist. Die Nadel ist an zwei Seidenfäden xy aufgehängt, so daß sie im Stande ist, sich unter dem Einflusse der elektrischen Kraft um eine vertikale Achse zu drehen, während sie immer in eine bestimmte Gleichgewichtslage zurückzukehren strebt.

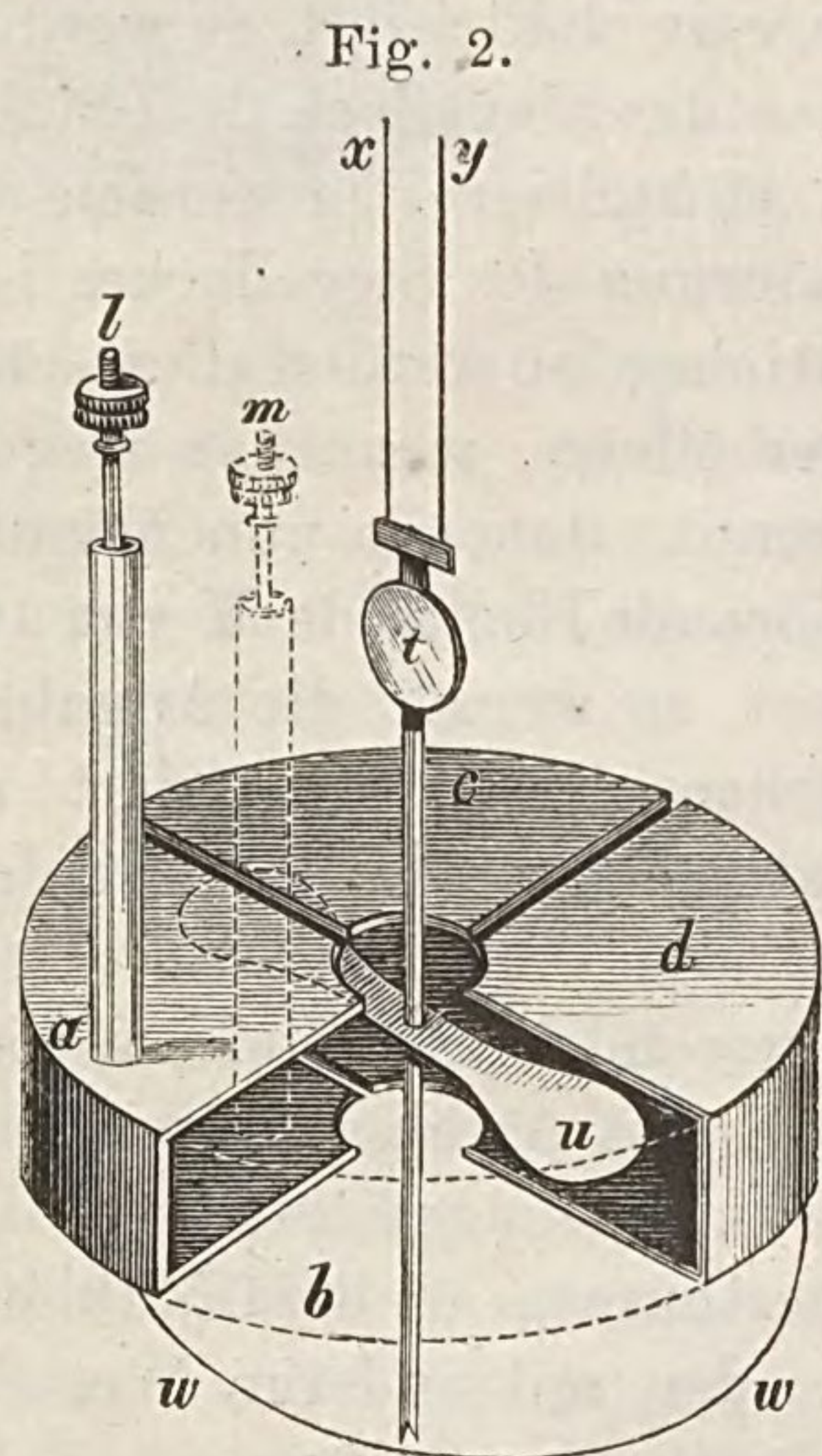


Fig. 2.

Die Achse trägt einen Konkavspiegel t , durch welchen das Bild einer Flamme und eines vertikalen, die Flamme halbiierenden Drahtes auf eine in Grade geteilte Skala geworfen wird, so daß es die Bewegung der Nadel um eine vertikale Achse anzeigt. Das untere Ende der Achse taucht in Schwefelsäure, welche in dem unteren Teile des Glasgehäuses des Instrumentes enthalten ist, und setzt auf diese Weise die Nadel in elektrische Verbindung mit der Säure. Das untere Ende der Achse trägt noch ein Stück Platin, welches in die Säure taucht und dazu dient, die Schwingungen der Nadel zu dämpfen. Die Nadel hängt in einem flachen, cylindrischen Messingkasten, mit kreisförmigen Öffnungen in der Mitte der oberen und unteren Fläche. Dieser

Kasten ist in vier Quadranten $abcd$ geteilt, welche von einander getrennt auf Glasfüßen befestigt sind und dadurch von dem Gehäuse und von einander isoliert sind. Der Quadrant b ist in der Figur weggelassen, um die Nadel sehen zu lassen. Die Stellung der Nadel, wenn sie im Gleichgewicht ist, ist derart, daß das eine Ende zur Hälfte im Quadranten a und zur Hälfte in c liegt, während das andere Ende zur Hälfte in b und zur Hälfte in d sich befindet.

Die Elektrode l ist mit dem Quadranten a und durch den Draht w auch mit d in Verbindung. Die andere Elektrode m ist mit den Quadranten b und c verbunden.

Die Nadel u wird immer auf einem hohen, im allgemeinen positiven Potential gehalten. Um die Potentialdifferenz zwischen irgend einem Körper und der Erde zu untersuchen, wird eine der Elektroden, z. B. m , mit der Erde verbunden, und die andere l mit dem zu untersuchenden Körper.

Die Quadranten b und c haben daher das Potential 0, die Quadranten a und d haben das zu bestimmende Potential und die Nadel u hat ein hohes positives Potential.

Die ganze Oberfläche der Nadel ist positiv elektrisch, die ganze innere Oberfläche der Quadranten ist negativ elektrisch, aber die Elektrisierung und die Anziehung ist, wenn alles andere gleich ist, dort am größten, wo die Differenz der Potentiale am größten ist. Wenn daher das Potential der Quadranten a und d positiv ist, wird sich die Nadel von a und d nach b und c bewegen, d. h. in Richtung der Uhrzeiger. Wenn das Potential von a und d negativ ist, wird sich die Nadel nach diesen Quadranten hin bewegen, d. h. entgegengesetzt der Richtung der Uhrzeiger.

Je größer das Potential der Nadel ist, desto größer wird die Kraft sein, die die Nadel zu drehen sucht und um so genauer werden die Angaben des Instrumentes sein.

Idiostatische und heterostatische Instrumente¹⁾.

14. In dem Goldblattelektroskop ist die einzige in dem Felde vorhandene Elektrizität die des zu untersuchenden Körpers. In dem Quadrantelektrometer wird die Nadel immer geladen gehalten. Instrumente, in welchen nur die Elektrizität vorhanden ist, welche wir untersuchen wollen, nennt man idiostatische; diejenigen, in welchen, abgesehen und unabhängig von der zu prüfenden Elektrizität, noch eine andere vorhanden ist, nennt man heterostatische. Bei einem idiostatischen Instrumente, wie dem Goldblattelektroskop, sind die Angaben dieselben, ob das zu untersuchende Potential positiv oder negativ ist, und die Gröfse des Ausschlages ist, wenn er sehr klein ist, nahezu proportional dem Quadrat der Potentialdifferenz. Bei einem heterostatischen Instrumente, wie beim Quadrantelektrometer, geht der Ausschlag nach der einen oder nach der anderen Seite, je nachdem das Potential positiv oder negativ ist, und die Gröfse des Ausschlages ist proportional der Potentialdifferenz selbst, nicht dem Quadrat dieser Differenz. Daher zeigt ein Instrument nach heterostatischem Prinzip nicht nur von selbst an, ob das Potential positiv oder negativ ist, sondern der Ausschlag ist auch für eine kleine Änderung des Poten-

¹⁾ Diese Bezeichnungen sind zwar in Deutschland noch nicht allgemein gebräuchlich. Sie empfehlen sich aber durch ihre Prägnanz und richtige Bildung. G.

tials ebenso groß, wenn das Potential sehr klein, als wenn es groß ist, während in dem Goldblattelektroskop eine sehr geringe Elektrisierung die Goldblättchen nicht zu merklicher Trennung bringt.

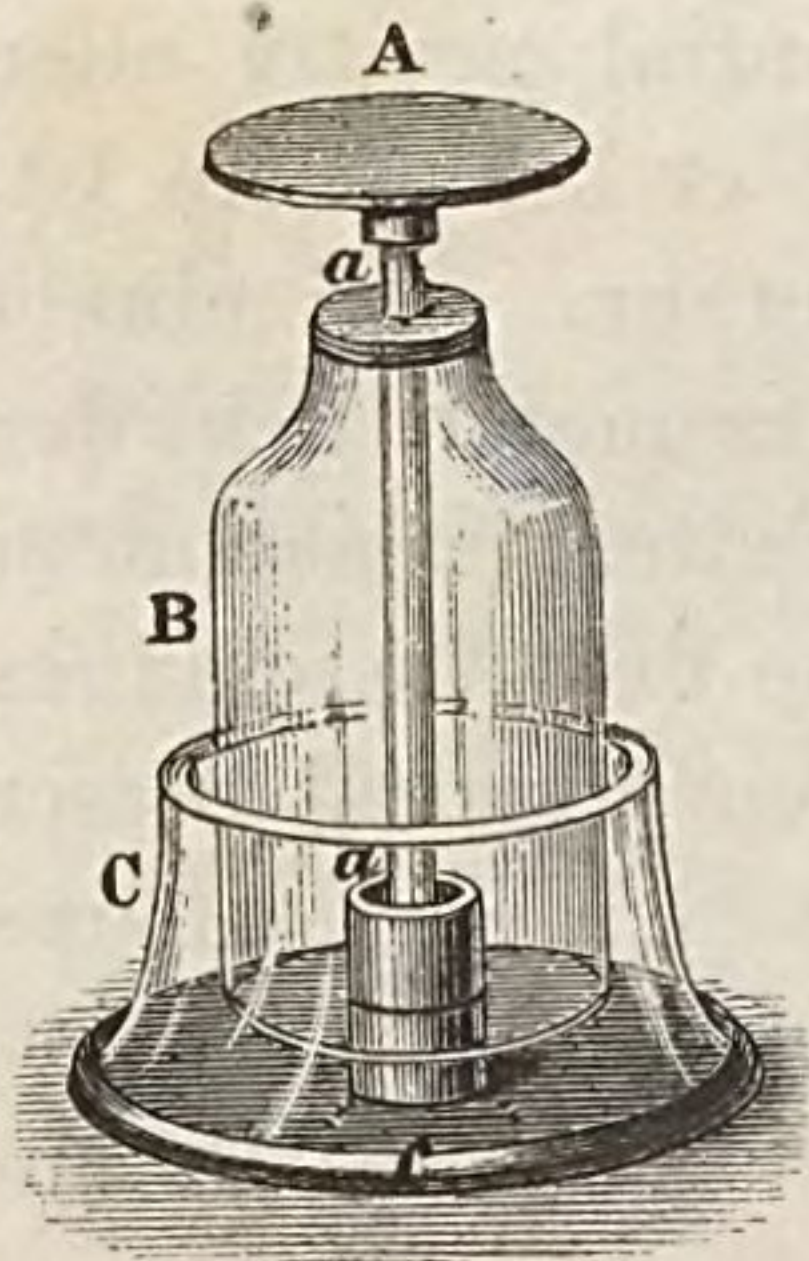
In Thomson's Quadrantelektrometer ist eine Einrichtung vorhanden, durch welche das Potential der Nadel immer auf einen konstanten Wert gebracht wird und außerdem sind noch andere Vorrichtungen für besondere Zwecke angebracht, Vorrichtungen, die aber in der Figur nicht dargestellt sind, da diese nur eine Zeichnung der wesentlichsten Teile des Instrumentes ist.

Über Isolatoren.

15. Bei elektrischen Experimenten ist es oft notwendig, einen elektrisierten Körper so zu stützen, daß die Elektrizität nicht entweichen kann. Für diesen Zweck ist nichts besser, als ihn auf ein von einem Glasstabe getragenes Gestell zu legen, vorausgesetzt, daß die Oberfläche des Glases ganz trocken ist. Aber außer bei ganz trockenem Wetter ist auf der Oberfläche des Glases immer etwas Feuchtigkeit kondensiert. Aus diesem Grunde stellt man elektrische Apparate oft vor ein Feuer, bevor man sie benutzt, so daß die Feuchtigkeit der Luft sich nicht auf der erwärmten Oberfläche des Glases kondensieren kann. Wenn aber das Glas zu warm geworden ist, so verliert es seine isolierende Fähigkeit und wird ein guter Leiter.

Deswegen ist es am besten eine Methode anzuwenden, durch welche die Oberfläche des Glases trocken gehalten werden kann, ohne daß man sie erwärmt.

Das isolierende Gestell in der Figur 3 besteht aus einem Glasgefäße *C* mit einem in der Mitte sich erhebenden Ringe, in welchen die Glassäule *aa* eingekittet ist. An den oberen Teil dieser Säule ist der Hals der Glasglocke *B* angekittet, welche von der Säule so getragen wird, daß ihr Rand innerhalb des Gefäßes *C* sich befindet, aber dieses nicht berührt. Die Säule *a* trägt den Tisch *A*, auf welchen der zu isolierende Körper gelegt wird.



In das Gefäß *C* wird etwas konzentrierte Schwefelsäure *c* gebracht, welche einen breiten flachen Ring um die Erhöhung in der Mitte bildet. Die Luft innerhalb der Glasglocke *B*, die in Berührung mit der Säule *a* ist, wird auf diese Weise getrocknet, und bevor feuchte Luft in diesen Teil des Instrumentes eintreten kann, muß sie zwischen *C* und *B* hindurchgehen und über die Oberfläche der Schwefelsäure hinstreichen, so daß sie voll-

kommen getrocknet wird, bevor sie die Glassäule erreicht. Ein solches isolierendes Gestell ist von grossem Wert, wenn genaue Experimente auszuführen sind. Für rohere Zwecke kann man isolierende Gestelle mit Glassäulen machen, die mit Schellack oder Siegellack oder Ebonit gefirnist sind.

16. Um einen elektrisierten Leiter zu tragen, ist es sehr zweckmässig, ihn an das Ende eines Ebonitstabes zu befestigen. Ebonit aber wird sehr leicht elektrisch. Die leiseste Berührung mit der Hand, oder irgend welche Reibung, ist hinreichend, seine Oberfläche so elektrisch zu machen, daß man auf die Elektrisierung des Leiters am Ende des Stabes keinen Schluß machen kann.

Der Stab darf deshalb nie berührt werden, sondern muß an einem Griff von Metall oder von Holz, das mit Zinnfolie belegt ist, gefaßt werden, und bevor man irgend ein Experiment macht, muß man die ganze Oberfläche des Ebonits frei von Elektrizität machen, indem man dasselbe rasch durch eine Flamme hindurchführt.

Die Nieten, durch welche die Leiter mit dem Ebonitstabe verbunden werden, sollten nicht über die Leiter vorspringen, denn die Elektrizität häuft sich nicht nur an den vorspringenden Teilen an, sondern kriecht auch auf die Oberfläche des Ebonits und bleibt dort haften, wenn die Elektrizität des Leiters entladen wird. Die Nieten sollten deshalb ganz innerhalb der äusseren Oberfläche der Leiter sein wie in Fig. 4.

Es ist zweckmässig, einen Messingring (Fig. 4) zu haben von 3 cm Durchmesser, ein cylindrisches Metallgefäß (Fig. 5) von ungefähr 9 cm Durchmesser und 15 bis 18 cm tief, ein Paar Platten von dünnem Blech (Figuren 6 und 7) von 6 cm Durchmesser, und einen dünnen Draht, ungefähr 30 cm lang (Fig. 8), um eine Verbindung

Fig. 4.



Fig. 5.

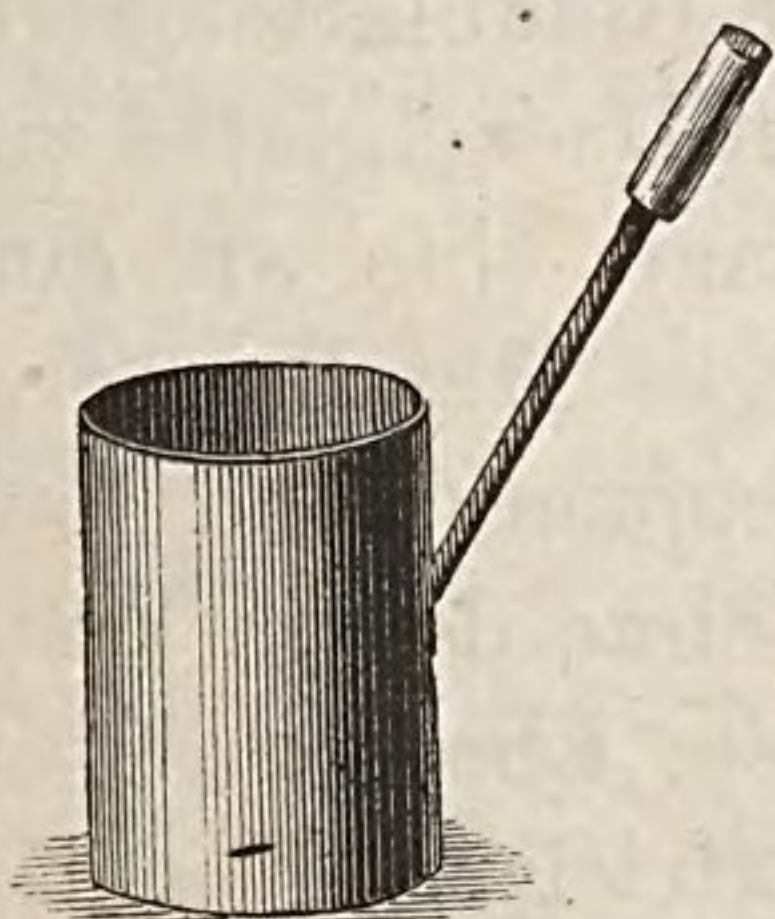


Fig. 6.



Fig. 7.



Fig. 8.



zwischen elektrischen Körpern machen zu können. Diese sollten alle befestigt sein an Ebonitstäben (Federhaltern) von $\frac{1}{2}$ cm Durchmesser mit Griffen aus Metall oder aus mit Zinnfolie belegtem Holze.

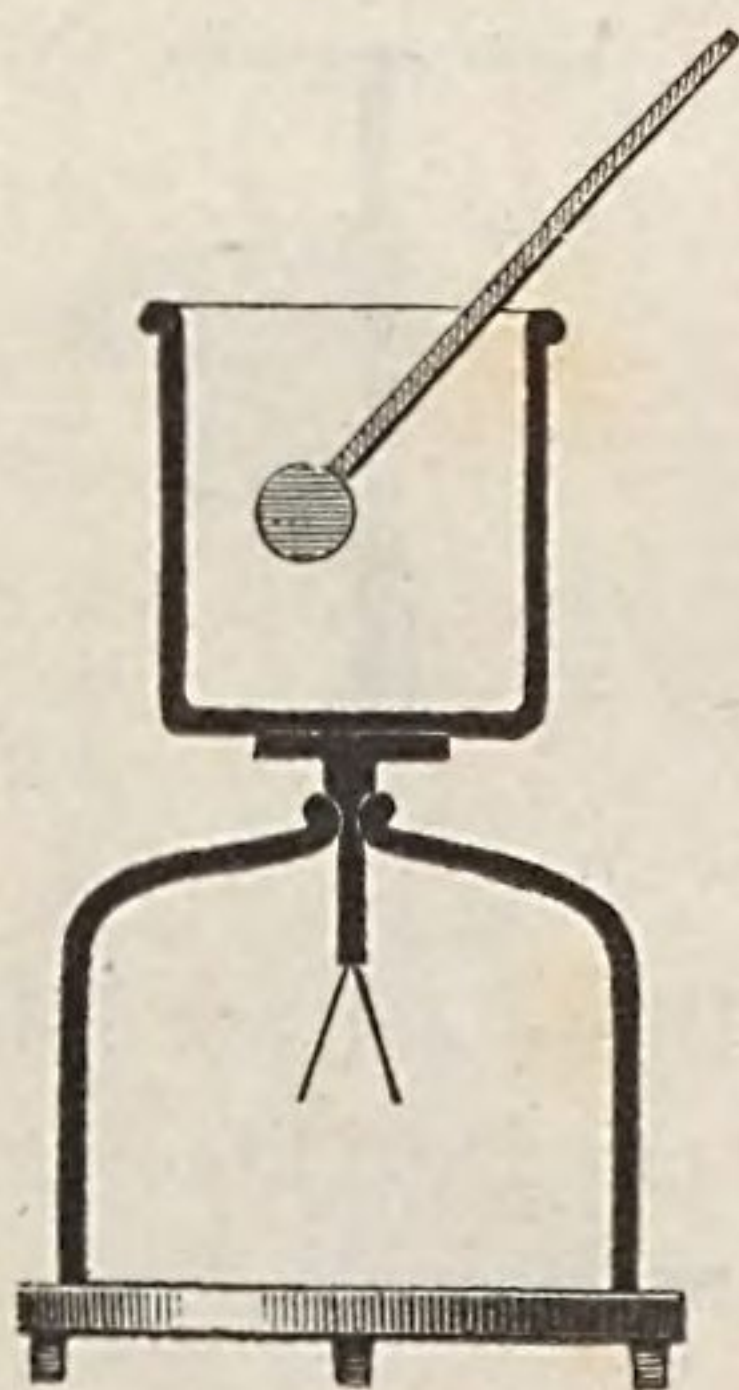
Zweites Kapitel.

Von den Ladungen elektrischer Körper.

Experiment VI.

17. Man nehme ein tiefes Metallgefäß — Faraday benutzte einen zinnernen Eiseimer —; sehr zweckmäfsig ist ein Stück Drahtnetz in Form eines Cylinders gerollt und auf eine Metallplatte gesetzt, da dann die in ihm befindlichen Gegenstände sichtbar bleiben. Dieses Gefäß setze man auf ein isoliertes Gestell und in die Nähe bringe man ein Elektroskop. Eine Elektrode des Elektroskops halte man beständig mit der Erde oder mit den Wänden des Zimmers verbunden, die andere mit dem isolierten Gefäße, entweder beständig durch einen Draht, der von der Elektrode zum Gefäße reicht, oder gelegentlich durch einen an einem Ebonitstabe befestigten Draht, den man zu gleicher Zeit mit dem Gefäße und der Elektrode in Berührung bringt. Wir wollen allgemein annehmen, dafs das Gefäß in beständiger Ver-

Fig. 9.



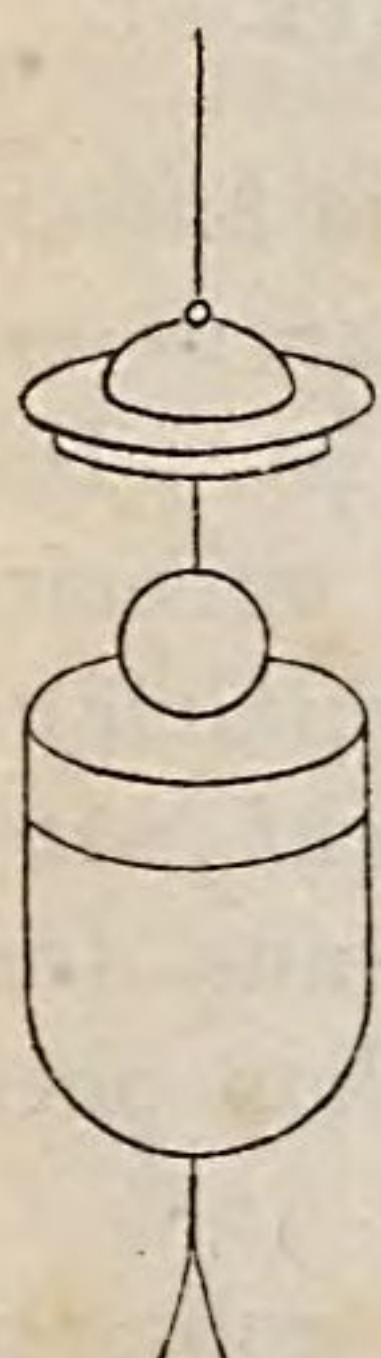
bindung mit dem Elektroskop ist. Am einfachsten ist es, wenn man ein Goldblattelektroskop anwendet, das Gefäß auf dessen Deckelplatte zu setzen.

Dann nehme man eine an einem Ende eines Ebonitstabes befestigte Metallkugel, elektrisiere sie mittels eines Elektrophors und bringe sie in das Metallgefäß hinein, ohne dessen Wände zu berühren, wobei man sie an dem Ebonitstabe anfaßt.

Solange die elektrisierte Kugel dem Gefäße genähert wird, wachsen die Angaben des Elektroskops fortwährend, aber wenn die Kugel ordentlich innerhalb des Gefäßes ist, d. h. wenn seine Tiefe unter der Öffnung des Gefäßes beträchtlich gegen den Durchmesser der Öffnung wird, wachsen die Angaben des Elektroskops nicht mehr, sondern bleiben unverändert, wie auch die Kugel in dem Gefäße herumbewegt wird.

Dieser Satz, welcher für ein beliebiges tiefes Gefäß angenähert richtig ist, ist in aller Strenge richtig für ein geschlossenes Gefäß. Dies kann man zeigen, indem man die Öffnung des Gefäßes mit einem Metaldeckel verschließt, den man an einem Seidenfaden fasst. Wenn die elektrisierte Kugel an einem Seidenfaden, der durch ein Loch im Deckel geht, in dem Gefäße auf- und abbewegt wird, bleibt die äußere Elektrisierung des Gefäßes, die durch das

Fig. 10.



Elektrometer angezeigt wird, unverändert, während die Kugel ihre Lage in dem Gefäße ändert. Prüft man die Elektrisierung der Goldblättchen, so findet man sie von derselben Art, wie die der Kugel.

Nun berühre man die Außenseite des Gefäßes mit dem Finger, so daß sie in elektrische Verbindung mit dem Boden und den Wänden des Raumes gebracht wird. Die äußere Elektrisierung des Gefäßes wird nun abgeleitet sein und die Goldblättchen werden zusammenfallen. Wird jetzt die Kugel in dem Gefäße hin- und herbewegt, so wird das Elektroskop kein Zeichen von Elektrisierung angeben; nimmt man aber die Kugel aus dem Gefäße heraus, ohne die Wände derselben zu berühren, so werden die Goldblättchen ebenso divergieren, wie während des ersten Teiles des Versuches. Ihre Elektrisierung wird indes jetzt entgegengesetzt der der Kugel gefunden werden.

Experiment VII.

Die Ladungen oder die gesamte Elektrisierung zweier elektrisierter Kugeln zu vergleichen.

Da die Elektrisierung an der Außenseite des Gefäßes immer dieselbe ist, welches auch die Lage der elektrischen Körper innerhalb des Gefäßes ist, so muß sie abhängen von der gesamten Elektrisierung der innen befindlichen Körper und nicht von der Verteilung dieser Elektrisierung. Wenn daher zwei Kugeln, die abwechselnd in das Gefäß gebracht werden, dieselbe Divergenz der Goldblättchen hervorbringen, so müssen ihre Ladungen gleich sein. Dies kann ferner dadurch geprüft werden, daß man die Außenseite des Gefäßes entladet, wenn die erste Kugel innen ist, dann diese entfernt und die zweite Kugel in das Gefäß bringt. Wenn die Ladungen gleich sind, wird das Elektroskop noch keine Elektrisierung anzeigen.

Wenn wir bestimmen wollen, ob die Ladungen zweier entgegengesetzt elektrisierter Körper dem absoluten Werte nach gleich sind, so entladen wir zu dem Zwecke das Gefäß und bringen beide Körper

in ihn hinein. Wenn die Ladungen gleich und entgegengesetzt sind, wird das Elektroskop gar nicht affiziert werden.

Experiment VIII.

Wenn ein elektrischer Körper in einem geschlossenen Metallgefäße hängt, so ist die gesamte Elektrisierung der inneren Oberfläche des Gefäßes gleich und entgegengesetzt der des Körpers.

Man hänge den Körper in das Gefäß und leite dann die äußere Elektrizität des Gefäßes ab. Dann hänge man das Ganze in ein größeres Gefäß, welches mit dem Elektroskop verbunden ist. Das Elektroskop wird keine Elektrizität anzeigen und wird auch unbeeinflusst bleiben, wenn der elektrisierte Körper aus dem kleineren Gefäße herausgenommen und in das größere Gefäß hineingebracht wird. Wenn aber der elektrische Körper oder das kleinere Gefäß aus dem größeren Gefäße herausgenommen wird, wird das Elektroskop positive oder negative Elektrizität anzeigen.

Wenn ein elektrischer Körper in ein ungeladenes Gefäß gebracht wird, so ist die Elektrizität an der Außenseite gleich der des Körpers. Dies folgt aus der schon bewiesenen Thatsache, daß die Elektrizität an der Innenfläche gleich und entgegengesetzt der des Körpers ist und aus dem Umstande, daß die Gesamtladung des Gefäßes Null ist.

Aber man kann das auch experimentell beweisen, indem man zuerst den elektrischen Körper selbst und dann denselben elektrischen Körper, umgeben von einem ungeladenen Gefäße, in das größere Gefäß bringt und beobachtet, daß die Angaben des Elektroskopes in beiden Fällen dieselben sind.

Experiment IX.

Wenn ein elektrischer Körper in ein geschlossenes Gefäß gebracht und dann mit dem Gefäße in elektrische Verbindung gesetzt wird, so ist der Körper vollkommen entladen.

20. Bei der Ausführung eines der vorhergehenden Experimente bringe man den elektrischen Körper in Berührung mit der Innenseite des Gefäßes, nehme ihn dann heraus und prüfe seine Ladung dadurch, daß man ihn in ein anderes Gefäß bringt, welches mit dem Elektroskop verbunden ist. Man wird ihn ganz frei von Elektrizität finden. Dies ist der Fall, wie stark auch der Körper ursprünglich elektrisiert

gewesen sein mag und wie stark das Gefäß selbst, dessen Innenseite berührt wurde, elektrisiert sein mag.

Wenn das Gefäß während des Experimentes mit dem Elektroskop verbunden gehalten wird, so bemerkt man keine Veränderung der Elektrizität an der Außenseite in dem Moment, wo der elektrische Körper mit der Innenseite des Gefäßes in Berührung gebracht wird. Dies liefert einen anderen Beweis dafür, daß die Elektrisierung der inneren Oberfläche gleich und entgegengesetzt ist der des innerhalb befindlichen elektrischen Körpers. Es zeigt auch, daß, wenn kein elektrischer Körper innerhalb dieser Oberfläche ist, jeder Teil dieser Oberfläche frei von Ladung ist.

Experiment X.

Ein Gefäß eine Anzahl Male mit der Ladung eines gegebenen elektrischen Körpers zu laden.

Man setze ein kleineres Gefäß in das gegebene, so daß es von ihm isoliert ist. Dann bringe man den elektrischen Körper in das innere Gefäß, indem man sorgfältig vermeidet, es zu entladen.

Fig. 11.



Nun werden die Ladungen auf der Außenseite des inneren sowohl wie des äußeren Gefäßes gleich sein der des Körpers und die Ladungen auf den Innenflächen werden numerisch auch gleich dieser, aber von entgegengesetzter Art sein. Nun stelle man eine elektrische Verbindung zwischen den beiden Gefäßen her. Die äußere Ladung des inneren Gefäßes und die innere Ladung des äußeren werden sich dann gegenseitig neutralisieren und das äußere Gefäß wird jetzt eine Ladung haben gleich der des Körpers und das innere Gefäß eine gleiche und entgegengesetzte.

Nun entferne man den elektrischen Körper, nehme das innere Gefäß heraus und entlade es; dann stelle man es wieder hinein, bringe den elektrischen Körper hinein und mache Kontakt zwischen den Gefäßen. Das äußere Gefäß hat jetzt eine doppelte Ladung erhalten und wenn man diesen Prozeß wiederholt, kann man dem äußeren Gefäße eine beliebige Anzahl von Ladungen, jede gleich der des elektrischen Körpers mitteilen.

Das äußere Gefäß mit Elektrizität zu laden, die der des elektrischen Körpers entgegengesetzt ist, ist noch leichter. Wir haben nur den elektrischen Körper in das kleinere Gefäß zu bringen, dieses für einen Moment mit den Wänden des Zimmers in Verbindung zu bringen, so daß seine äußere Elektrizität abgeleitet wird, dann den elektrischen

Körper zu entfernen und das Gefäß in das grössere hineinzubringen und es mit der Innenseite desselben in Kontakt zu setzen, so daß es dem größeren Gefäße seine negative Ladung mitteilt, endlich das kleinere Gefäß zu entfernen und diesen Prozeß die verlangte Anzahl Male zu wiederholen.

Wir haben so eine Methode, um die elektrischen Ladungen von verschiedenen Körpern vergleichen zu können, ohne sie zu entladen, indem wir Ladungen gleich der eines gegebenen elektrischen Körpers hervorbringen und zwar entweder von demselben oder von entgegengesetztem Zeichen, und eine Zahl von solchen Ladungen zusammen addieren.

22. Auf diese Weise können wir die folgenden Gesetze der elektrischen Erscheinungen erläutern und ihre Richtigkeit erproben:

I. Die gesamte Elektrizität oder Ladung eines Körpers oder eines Systems von Körpern bleibt immer dieselbe, außer insoweit es Elektrizität von anderen Körpern empfängt oder an andere Körper abgibt.

Bei allen elektrischen Experimenten findet man, daß die Elektrisierung der Körper sich ändert, aber man bemerkt auch immer, daß diese Änderung von mangelhafter Isolation herrührt und daß der Verlust an Elektrizität um so kleiner wird, je mehr die Isolationsmittel verbessert werden. Wir können daher behaupten, daß die Elektrisierung eines Körpers, bei dem jede elektrische Mitteilung an alle anderen Körper durch ein vollkommen isolierendes Medium verhindert ist, vollkommen konstant bleiben würde.

II. Wenn ein Körper einen andern durch Leitung elektrisiert, so bleibt die gesamte Elektrisierung der beiden Körper dieselbe, d. h. der eine verliert ebensoviel positive oder gewinnt ebensoviel negative Elektrizität als der andere positive Elektrizität gewinnt oder negative verliert.

Denn wenn die elektrische Verbindung gemacht wird, während beide Körper in einem Metallgefäße eingeschlossen sind, wird im Moment des Kontaktes keine Änderung der gesamten Elektrisierung beobachtet.

III. Wenn Elektrizität durch Reibung oder durch irgend eine andere bekannte Methode erzeugt wird, so werden immer gleiche Mengen positiver und negativer Elektrizität erzeugt.

Denn wenn der Prozeß der Elektrisierung in dem geschlossenen Gefäße vorgenommen wird, so bleibt, wie stark auch die Elektrisierung der Teile des Systems sein mag, doch die Elektrisierung des Ganzen, wie sie durch ein mit dem Gefäße verbundenes Elektroskop angezeigt wird, Null.

IV. Wenn ein elektrischer Körper oder ein System von Körpern in eine geschlossene leitende Fläche hinein gebracht wird (welche aus dem Boden, den Wänden und der Decke des Raumes, in welchem

das Experiment gemacht wird, bestehen kann), so ist die innere Elektrisierung dieser Fläche gleich und entgegengesetzt der des Körpers oder des Systems von Körpern.

V. Wenn kein elektrischer Körper innerhalb der hohlen leitenden Fläche sich befindet, ist die Elektrisierung dieser Fläche Null. Dies ist nicht nur für die Elektrisierung der Fläche als Ganzes, sondern auch für jeden Teil dieser Fläche richtig.

Denn wenn ein Leiter in die Oberfläche hinein und in Berührung mit ihr gebracht wird, so hängt die Oberfläche dieses Leiters elektrisch mit der inneren Oberfläche des einschließenden Gefäßes zusammen, und wenn man den Leiter herausnimmt und untersucht, so findet man seine Elektrisierung stets gleich Null; zum Beweise, daß die innere Elektrisierung jedes Teiles einer inneren Oberfläche, innerhalb welcher ein unelektrischer Körper sich befindet, Null ist.

Mittels Thomsons Quadrantelektrometer kann man leicht die Elektrizitätsmenge eines Körpers messen, wenn sie nur ein Milliontel von der ist, bis zu welcher man ihn für Experimente passend ladet. Der experimentelle Beweis obiger Sätze zeigt also, daß sie selbst nicht bis auf ein Milliontel der betreffenden ursprünglichen Elektrisierung irrthümlich sein können.

Drittes Kapitel.

Über elektrische Arbeit und Energie.

23. Arbeit im allgemeinen ist die Erzeugung einer Veränderung in der Konfiguration eines materiellen Systems in Gegenwirkung gegen eine Kraft, welche dieser Veränderung Widerstand leistet.

Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu leisten.

Man nennt ein System ein konservatives System, wenn es von der Art ist, daß, wenn das System erst eine beliebige Reihe von Änderungen erlitten hat und dann auf irgend eine Weise in seinen Anfangszustand zurückgebracht worden ist, daß dann die gesamte Arbeit, welche durch äußere Wirkung auf das System aufgewendet ist, gleich der gesamten Arbeit ist, welche das System zur Überwindung äußerer Kräfte geleistet hat.

Der Fortschritt der physikalischen Wissenschaft hat zu der Untersuchung verschiedener Formen von Energie geführt und zu der Begründung der Ansicht, daß alle materiellen Systeme als konservative Systeme betrachtet werden können, falls nur alle die verschiedenen Formen von Energie in Rechnung gezogen werden. Diese Lehre, angesehen als eine Deduktion aus Experimenten, kann natürlich nicht mehr behaupten, als daß bisher kein Beispiel eines nicht konservativen Systems entdeckt worden ist, aber als wissenschaftliche oder Wissen schaffende Lehre erlangt sie immer neue Glaubwürdigkeit aus der stets wachsenden Zahl von Folgerungen, welche aus ihr gezogen worden sind, und welche in allen Fällen bestätigt worden sind. In der That ist dies der einzige verallgemeinerte Satz, welcher mit den Thatsachen nicht nur in einem Zweige der Physik, sondern in allen in Übereinstimmung gefunden worden ist. Hat man diesen Satz einmal aufgefaßt, so liefert er dem Forscher im Gebiete der Physik ein Prinzip, auf welches er jedes bekannte Gesetz von physikalischen Wirkungen zurückführen kann und durch welches er in den Stand gesetzt werden kann, die Gesetze solcher Wirkungen in neuen Zweigen der Wissenschaft zu entdecken. Aus diesen Gründen nennt man diesen Satz gewöhnlich das Prinzip von der Erhaltung der Energie.

Allgemeiner Satz von der Erhaltung der Energie.

24. Die gesamte Energie irgend eines Systems von Körpern ist eine Gröfse, welche durch eine gegenseitige Wirkung dieser Körper weder vermehrt noch vermindert werden kann, obwohl sie in irgend eine der Formen verwandelt werden kann, welche die Energie annehmen kann.

Wenn die Konfiguration des Systems durch die Wirkung irgend eines äufseren Agens geändert wird, dann sagt man, wenn die Kräfte des Systems so beschaffen sind, dafs sie dieser Änderung der Konfiguration Widerstand leisten, das äufsere Agens leiste Arbeit an dem System. In diesem Falle wird die Energie des Systems vermehrt. Wenn dagegen die Kräfte des Systems selbst die Änderung der Konfiguration hervorzubringen streben, so dafs das äufsere Agens nur diese Veränderung zuzulassen braucht, so sagt man, das System leiste Arbeit an dem äufseren Agens und in diesem Falle wird die Energie des Systems vermindert. Wenn z. B. ein Fisch an den Angelhaken angebissen hat und wegschwimmt und der Angler ihm folgt, aus Furcht seine Leine könnte reißen, so leistet der Fisch Arbeit gegen den Angler, wenn aber der Fisch matt wird und der Angler ihn ans Ufer zieht, so leistet der Angler Arbeit gegen den Fisch.

Die Arbeit wird immer gemessen durch das Produkt aus der Änderung der Konfiguration in die Kraft, welche dieser Änderung Widerstand leistet. Wenn z. B. ein Mann einen schweren Körper hebt, so wird die Änderung der Konfiguration gemessen durch die Zunahme der Entfernung zwischen dem Körper und der Erde, und die Kraft, welche Widerstand leistet, ist das Gewicht des Körpers. Das Produkt dieser beiden Gröfsen misst die von dem Manne geleistete Arbeit. Wenn der Mann, statt den schweren Körper vertikal aufwärts zu heben, ihn auf einer schiefen Ebene bis zu derselben Höhe über dem Boden hinaufrollt, so ist die gegen die Schwere geleistete Arbeit genau dieselbe; denn obwohl der schwere Körper eine gröfsere Strecke hindurchbewegt worden ist, ist es nur die vertikale Komponente dieser Strecke, welche mit der Richtung der Schwerkraft, die auf den Körper wirkt, zusammenfällt.

25. Wenn ein Körper mit positiver Ladung von Elektrizität von einem Menschen von einer Stelle niederen zu einer Stelle höheren Potentials gebracht wird, so stellt sich dieser Bewegung die elektrische Kraft entgegen und der Mensch leistet Arbeit an dem elektrischen System, und vermehrt dadurch dessen Energie. Der Betrag der Arbeit wird gemessen durch das Produkt der Zahl der Elektrizitätseinheiten in den Zuwachs des Potentials bei der Bewegung von der einen Stelle nach der anderen.

Wir erhalten so die dynamische Definition des elektrischen Potentials.

Das elektrische Potential an einem gegebenen Punkte des Feldes wird durch den Betrag der Arbeit gemessen, welche von einem äusseren Agens geleistet werden mufs, um eine Einheit positiver Elektrizität von einer Stelle, wo das Potential Null ist, bis zu dem gegebenen Punkte zu bringen.

Diese Definition ist in Übereinstimmung mit der unvollständigen Definition, welche im Artikel 6 gegeben ist; denn die Arbeit, die geleistet wird, um eine Elektrizitätseinheit von einer Stelle zu einer anderen zu schaffen, wird positiv oder negativ sein, je nachdem die Verrückung von einem niederen zu einem höheren oder von höherem zu niederem Potential geschieht. In dem letzteren Falle wird die Bewegung, wenn sie nicht verhindert wird, ohne eine Einwirkung von aussen stattfinden, indem sie nur den elektrischen Kräften des Systems nachgibt. Daher strömt die Elektrizität auf Leitern stets von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials.

26. Wir haben bereits die elektromotorische Kraft von einer Stelle nach einer anderen hin auf einem gegebenen Wege als die Arbeit definiert, welche von den elektrischen Kräften des Systems auf die Einheit der Elektrizität ausgeübt wird, die längs dieses Weges fortgeführt wird. Die elektromotorische Kraft wird daher durch den Überschufs des Potentials am Anfange des Weges über das am Ende des Weges gemessen.

Die elektromotorische Kraft an einem Punkte ist die Kraft, mit welcher das elektrische System auf einen kleinen Körper wirken würde, welcher mit einer Einheit positiver Elektrizität versehen sich an diesem Punkte befinden würde.

Wenn der elektrische Körper so bewegt wird, dafs er auf derselben Oberfläche gleichen Potentials bleibt, so wird weder von den elektrischen Kräften noch gegen sie Arbeit geleistet. Die Richtung der elektrischen Kraft, die auf den kleinen Körper wirkt, ist also eine solche, dafs jede Verrückung des Körpers auf irgend einer Linie, die auf der Oberfläche gleichen Potentials gezogen ist, rechtwinkelig zu der Kraft ist. Die Richtung der elektromotorischen Kraft steht also selbst rechtwinkelig auf der Fläche gleichen Potentials.

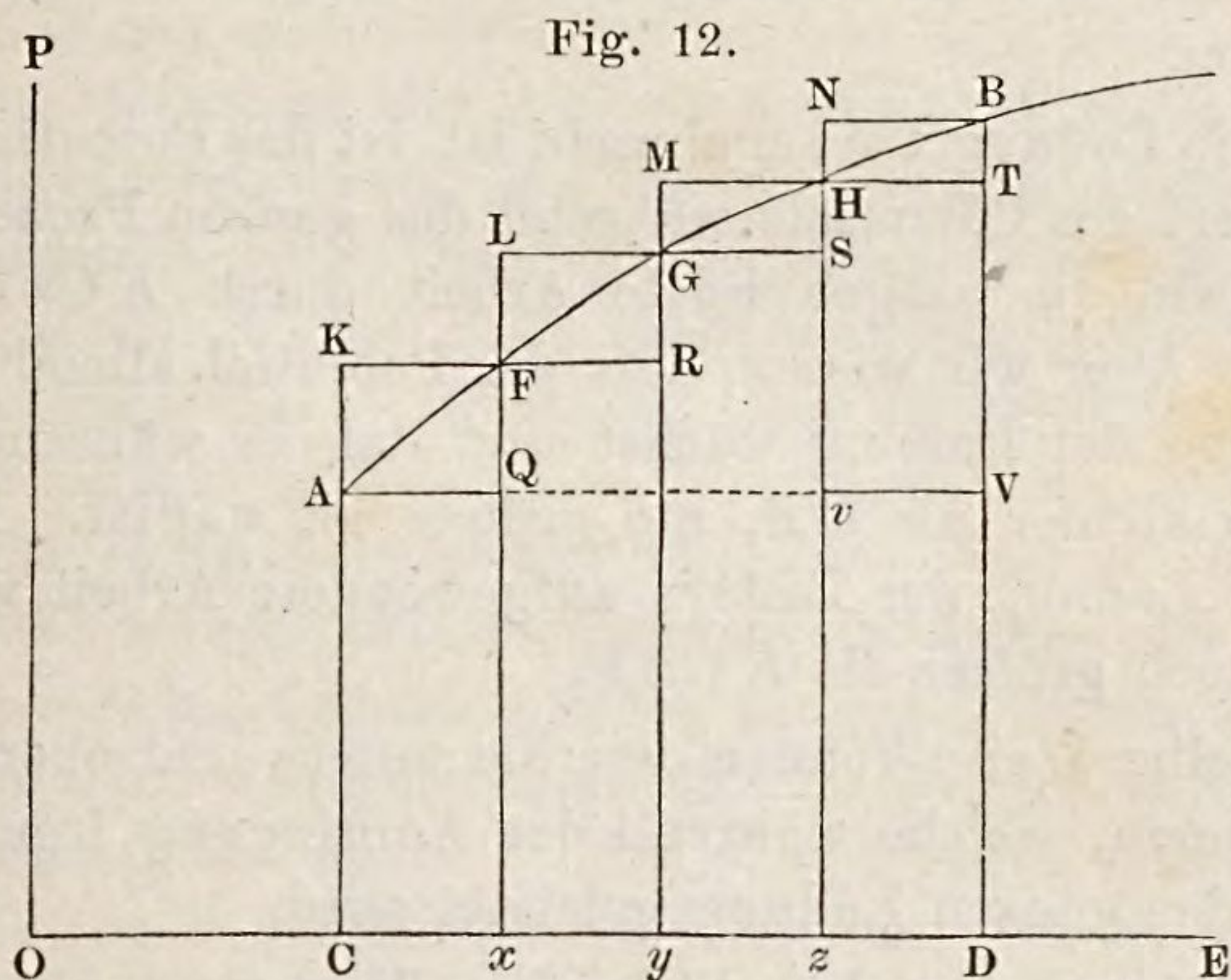
Die Gröfse dieser Kraft, multipliziert mit dem Abstände zwischen zwei benachbarten Flächen gleichen Potentials, gibt die Arbeit, die bei dem Übergange von der einen Fläche gleichen Potentials zu der anderen geleistet wird, d. h. die Differenz ihrer Potentiale.

Man kann daher die Gröfse der elektrischen Kraft finden, indem man die Differenz der Potentiale zweier benachbarten Flächen gleichen Potentials durch den Abstand derselben dividiert, natürlich wenn

dieser Abstand sehr klein ist und senkrecht zu jeder Fläche gemessen wird. Die Richtung der Kraft ist die der Normale zu der Oberfläche gleichen Potentials an dem gegebenen Punkte, und wird in der Richtung gerechnet, in welcher das Potential abnimmt.

Indikator-Diagramm der elektrischen Arbeit.

27. Das Indikator-Diagramm, welches von Watt angewendet wurde, um die von einer Dampfmaschine geleistete Arbeit zu messen ¹⁾, kann bei der Untersuchung der Arbeit benutzt werden, welche während der Ladung eines Leiters mit Elektrizität geleistet wird.



Die Ladung des Leiters in einem gegebenen Augenblicke sei durch eine horizontale Linie OC von dem Punkte O aus, welcher der Anfangspunkt des Diagramms heißt, dargestellt und das Potential des Leiters in dem gegebenen Augenblicke sei durch eine vertikale Linie CA dargestellt, die von dem Endpunkte der ersten Linie aus gezogen ist, dann wird der Ort des Endpunktes der zweiten Linie den elektrischen Zustand des Leiters angeben, sowohl in Bezug auf seine Ladung als in Bezug auf sein Potential.

Wenn dieser Punkt sich während irgend einer elektrischen Operation längs der Linie $AFGHB$ bewegt, so erkennen wir nicht nur, daß die Ladung von dem Werte OC bis zu dem Werte OD zugenommen hat und daß das Potential von CA bis DB gewachsen ist, sondern daß die Ladung und das Potential in einem Augenblicke, z. B. dem, der dem Punkte F der Kurve entspricht, respektive durch Ox und durch xF dargestellt werden.

¹⁾ Maxwells „Theory of Heat“, 4. Aufl., p. 102. Deutsche Ausgabe von Auerbach p. 110, von Neesen p. 117.

28. Theorem. Die von einem äusseren Agens aufgewendete Arbeit, um den Ladungszuwachs von den Wänden des Raumes auf den Konduktor zu bringen, wird durch die geschlossene Fläche dargestellt, die durch die Grundlinie CD , die beiden Vertikallinien CA und DB und die Kurve $AFGHB$ gebildet wird.

Zum Beweise teile man CD , die Zunahme der Ladung, in eine Anzahl gleicher Teile an den Punkten xyz .

Der Wert des Potentials gerade vor der Anbringung der Ladung Cx wird durch AC dargestellt. Wenn daher das Potential während der Anbringung der Ladung Cx konstant bleiben sollte, so würde die zu der Ladung des Leiters aufgewendete Arbeit durch das Produkt dieses Potentials und der Ladung oder durch die Fläche $ACxQ$ dargestellt werden.

Sobald die Ladung Cx angebracht ist, ist das Potential xF . Wenn dieses der Wert des Potentials während des ganzen Prozesses gewesen wäre, so würde die aufgewendete Arbeit durch $KCx F$ dargestellt worden sein. Aber wir wissen, daß das Potential allmählich während der Anbringung der Ladung wächst und daß es während des ganzen Prozesses nie kleiner als CA , nie gröfser als xF ist. Daher ist die ganze bei der Ladung des Leiters aufgewendete Arbeit weder kleiner als $ACxQ$, noch gröfser als $KCx F$.

Auf dieselbe Weise können wir die untere und obere Grenze der Arbeit bestimmen, welche während der Anbringung irgend eines anderen Teiles der ganzen Ladung geleistet wird.

Wir schliessen daher, daß die bei dem Wachsen der Ladung von OC bis OD aufgewendete Arbeit nicht kleiner ist als die Fläche der Figur $CAQFRGSEFD$ und nicht gröfser als $CKFLGMHNBD$. Die Differenz zwischen diesen beiden Werten ist die Summe der Parallelogramme KQ , LR , MS , NT , deren Breiten gleich sind, und deren vereinigte Höhe BV ist. Ihre vereinigte Fläche ist daher gleich der des Parallelogramms $NvVB$.

Wächst die Zahl der gleichen Teile, in welche wir die Ladung geteilt haben, unbegrenzt, so wird die Breite der Parallelogramme unbegrenzt kleiner werden. Im Grenzfalle verschwindet daher die Differenz der beiden Werte der Arbeit und jeder von beiden Werten wird zuletzt gleich der Fläche $CAFGHBD$, die durch die Kurve, die Grenzordinaten und die Grundlinie begrenzt ist.

Diese Beweismethode ist in jedem Falle anwendbar, wenn das Potential beständig wächst oder beständig abnimmt, während die Ladung wächst. Wenn das nicht der Fall ist, so kann man den Prozeß des Ladens in eine Anzahl von Teilen teilen, von denen in jedem das Potential entweder beständig wächst oder beständig abnimmt, und den Beweis auf jeden dieser Teile anwenden.

Superposition elektrischer Wirkungen.

29. Aus Experiment VII. ersieht man, daß, wenn man verschiedene elektrische Körper in ein Hohlgefäß bringt, jeder seine eigene Wirkung in Bezug auf die Elektrisierung des Gefäßes ausübt, in welcher Lage die Körper sich auch befinden mögen. Daraus folgt, daß wenigstens ein elektrisches Phänomen, die sogenannte Elektrisierung durch Induktion, derart ist, daß der Effekt der ganzen Elektrisierung die Summe der Wirkungen ist, die von den verschiedenen Teilen der Elektrisierung herrühren. Die verschiedenen elektrischen Phänomene indessen sind so eng miteinander verbunden, daß wir zu dem Schlusse geführt werden, daß auch alle anderen elektrischen Phänomene als aus Teilen zusammengesetzt betrachtet werden können, wobei jeder Teil von einem entsprechenden Teil der Elektrizität herrührt.

Wenn z. B. ein Körper A , in einer bestimmten Weise elektrisiert, ein gegebenes Potential P an einem gegebenen Punkte des Feldes hervorbringen würde, und wenn ein Körper B , der auch in einer bestimmten Weise elektrisiert ist, ein Potential Q an demselben Punkte des Feldes hervorbringen würde, dann wird, wenn beide Körper noch ebenso elektrisiert wie früher, zugleich an ihre früheren Stellen in dem Felde gebracht werden, das Potential an dem gegebenen Punkte $P + Q$ sein. Dieser Satz kann durch direkte Experimente verifiziert werden, aber die am meisten genügende Verifikation gründet sich auf eine Vergleichung seiner Konsequenzen mit wirklichen Erscheinungen.

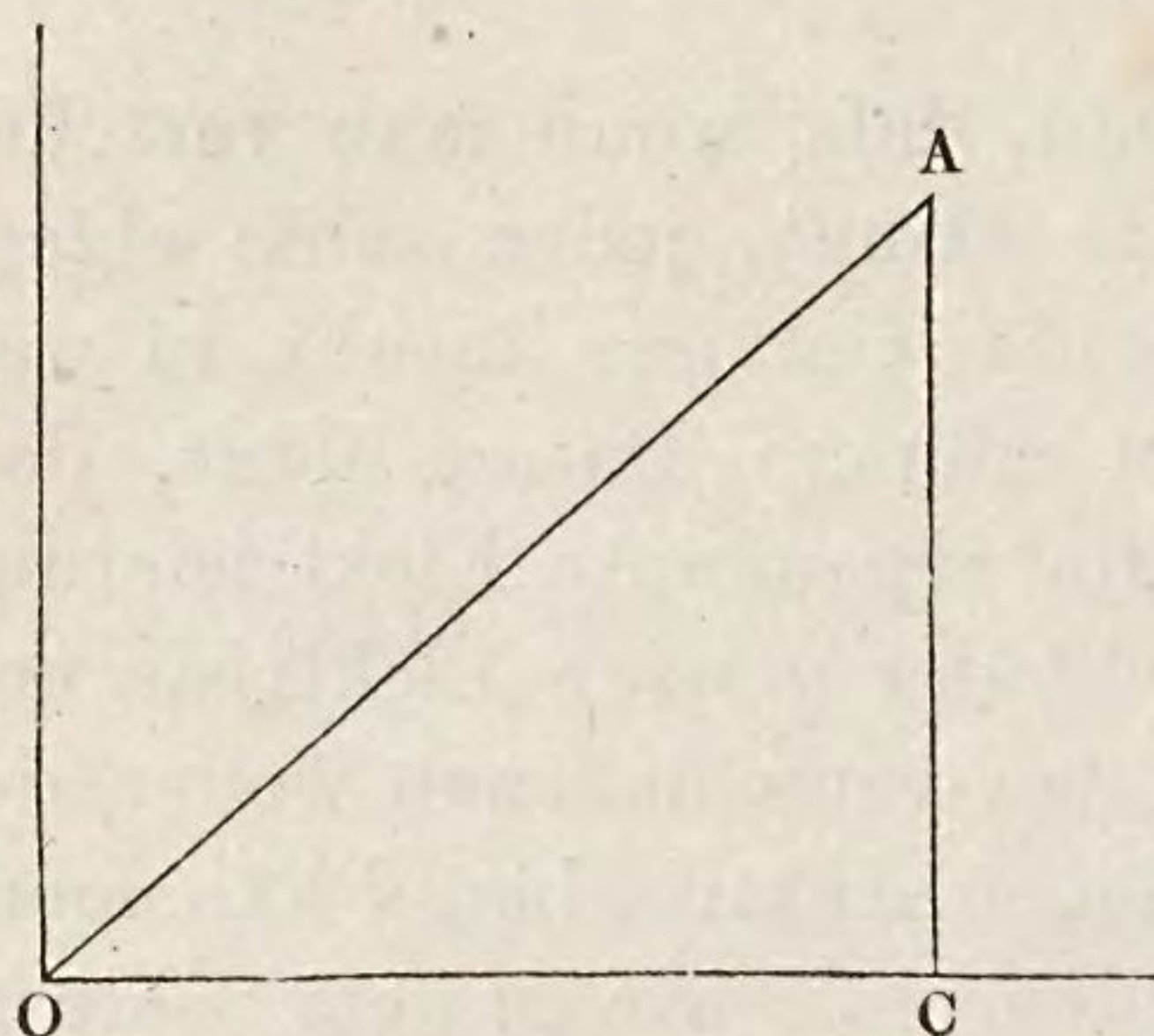
Ein spezieller Fall ist der, daß die Elektrisierung jedes Teiles des Systems n mal vervielfältigt wird. Dann wird das Potential an jedem Punkte des Systems auch mit n multipliziert sein.

30. Nehmen wir nun an, daß das elektrische System aus einer Reihe von Leitern besteht (welche wir A_1, A_2 u. s. w. nennen wollen), die voneinander isoliert sind und mit Elektrizität geladen werden können. Die Ladungen dieser Leiter mögen mit E_1, E_2 u. s. w. und ihre Potentiale mit P_1, P_2 u. s. w. bezeichnet werden.

Wenn zuerst die Leiter alle ohne Ladung und auf dem Potential Null sind und wenn in einem bestimmten Moment jeder Leiter anfängt, mit Elektrizität geladen zu werden, so daß die Ladung gleichmäßig mit der Zeit wächst, und wenn dieser Prozeß solange fortgesetzt wird, bis die Ladungen zugleich E_1 für den ersten Leiter, E_2 für den zweiten und so fort werden, dann wird, da die Zunahme der Ladung jedes Leiters während des Prozesses für jedes gleiche Zeitintervall dasselbe ist, auch die Zunahme des Potentials jedes Leiters für jede gleiche Zunahme der Zeit dieselbe sein, so daß die Linie, welche in dem Indikatordiagramm die aufeinander folgenden Zustände

eines gegebenen Leiters in Bezug auf Ladung und Potential darstellt, mit einer Geschwindigkeit beschrieben werden muß, deren Horizontal- und Vertikalkomponenten während des Prozesses konstant bleiben. Diese

Fig. 13.



Linie in dem Diagramm ist daher eine Gerade, von dem Anfangspunkte aus, welcher den Zustand des Systems darstellt, wenn es frei von Ladung und auf dem Potential Null ist, nach dem Punkte A_1 gezogen, welcher den Endzustand des Leiters angibt, wenn seine Ladung E_1 und sein Potential P_1 ist und diese Linie wird den Prozess der Ladung des Leiters A_1 darstellen. Die

zur Ladung dieses Leiters aufgewendete Arbeit wird durch die Fläche OCA oder durch das halbe Produkt der Endladung E und des Endpotentials P dargestellt.

Energie eines Systems elektrischer Körper.

31. Wenn die relativen Lagen der Leiter fest sind, so wird die zur Ladung aufgewendete Arbeit ganz in elektrische Energie umgewandelt. Wenn sie in der eben beschriebenen Weise geladen werden, so ist die bei der Ladung irgend eines von ihnen aufgewendete Arbeit $\frac{1}{2}EP$, wo E dessen Endladung und P dessen Endpotential darstellt. Die zur Ladung des ganzen Systems aufgewendete Arbeit kann deshalb geschrieben werden

$$\frac{1}{2}E_1 P_1 + \frac{1}{2}E_2 P_2 + \dots,$$

wobei so viele Produkte vorkommen, als Leiter in dem System vorhanden sind.

Es ist zweckmäßig, die Summe einer solchen Reihe von Termen in der Form

$$\frac{1}{2}\Sigma (EP)$$

zu schreiben, wo das Symbol Σ (Sigma) angibt, daß alle die Produkte von der Form EP zusammen zu addieren sind, wobei für jeden von den Leitern, aus denen das System besteht, ein solches Produkt vorhanden ist.

Da ein elektrisches System dem Gesetze der Erhaltung der Energie unterworfen ist, ist die zur Ladung derselben aufgewendete Energie ganz in dem System in der Form von elektrischer Energie gespeichert. Der Wert dieser Energie ist daher gleich dem der Arbeit, welche sie hervorbrachte, oder $\frac{1}{2}\Sigma (EP)$. Aber die elektrische Energie

des Systems hängt ganz von seinem augenblicklichen Zustande und nicht von seiner Vorgeschichte ab. Daher haben wir

Theorem I.

Die elektrische Energie eines Systems von Leitern ist, auf welchem Wege dieselben auch geladen worden sein mögen, gleich der halben Summe der Produkte der Ladung in das Potential jedes Leiters.

Wir wollen die elektrische Energie des Systems durch das Symbol Q bezeichnen, so dafs ist

$$Q = \frac{1}{2} \Sigma (EP) (1)$$

Die zur Änderung der Ladung des Systems aufgewendete Arbeit.

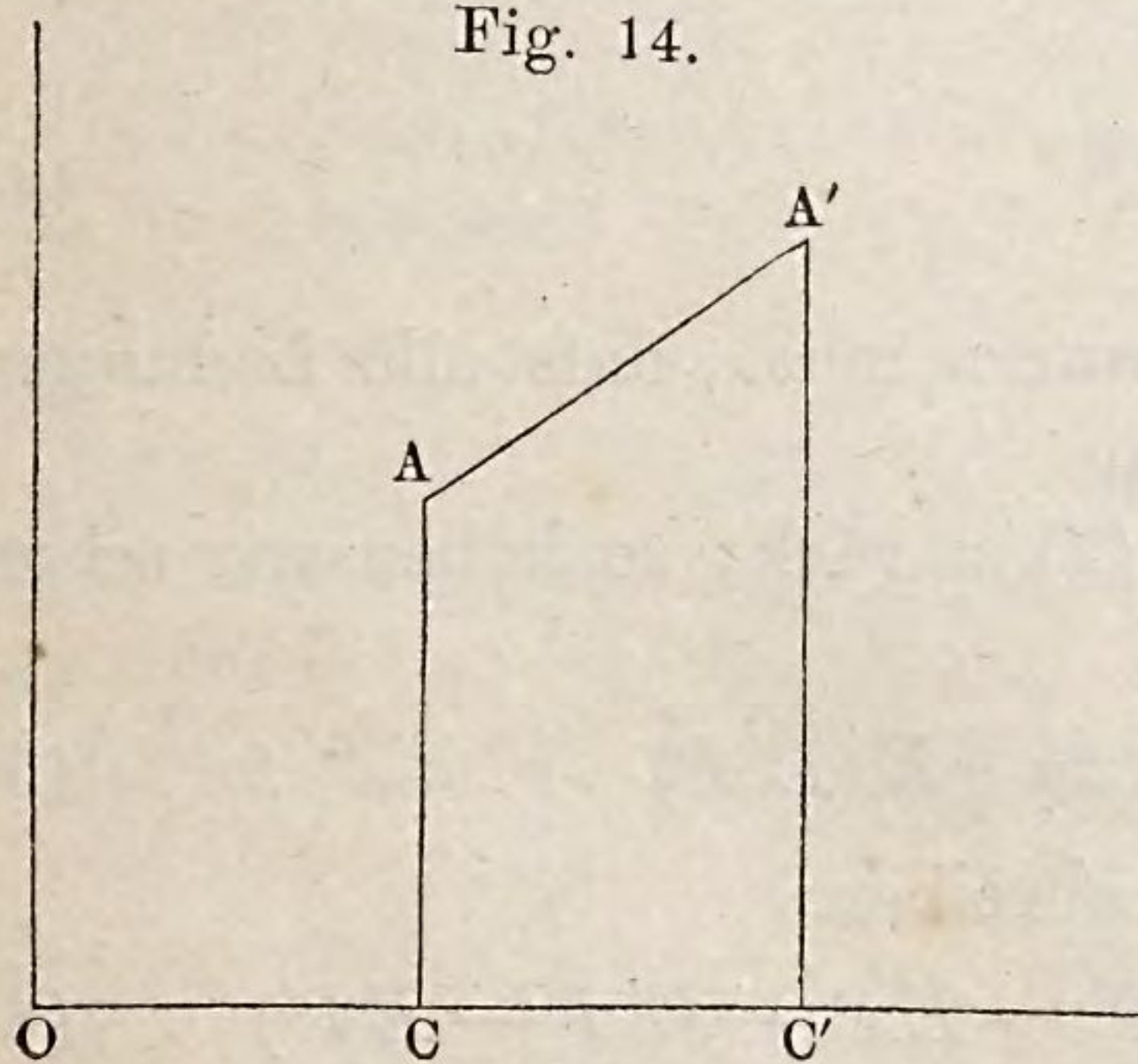
32. Wir wollen nun weiter annehmen, dafs die Leiter des Systems nicht am Beginn ohne Ladung und auf dem Potential Null sind, sondern dafs sie bei Beginn des Prozesses mit Elektrizitätsmengen E_1, E_2 u. s. w. geladen und beziehlich auf den Potentialen P_1, P_2 u. s. w. sind.

Von diesem Zustande aus mögen die Ladungen der Leiter geändert werden, jede in gleichförmiger Weise, aber so, dafs diese gleichförmige Änderung im allgemeinen für jeden Leiter eine andere ist und dieser Prozeß gehe gleichförmig weiter, bis die Ladungen beziehlich E_1', E_2' u. s. w. und die Potentiale P_1', P_2' u. s. w. geworden sind.

Nach dem Prinzip der Übereinanderlagerung elektrischer Wirkungen wird der Zuwachs des Potentials sich ebenso wie der Zuwachs

der Ladung ändern, und das Potential jedes Leiters wird gleichmässig von P zu P' wachsen oder abnehmen, während seine Ladung gleichmässig von E zu E' sich ändert. Die Linie AA' , welche die Veränderung des Zustandes des Leiters während des Prozesses darstellt, ist daher diejenige gerade Linie, welche den Punkt A , der den Anfangszustand darstellt, mit A' , welche den Endzustand repräsentiert, verbindet,

Fig. 14.



Die zur Erzeugung dieses Zuwachses der Ladung auf dem Leiter aufgebrauchte Arbeit wird durch die Fläche $ACCA'$ dargestellt, die gleich $\frac{1}{2}CC'(CA + C'A') = \frac{1}{2}(E' - E)(P + P')$ ist, oder in Worten, diese Arbeit ist das Produkt aus dem Zuwachs der Ladung in die halbe Summe der Potentiale am Anfang und Ende der Operation, und dies gilt für jeden Leiter des Systems.

Da während dieses Prozesses die elektrische Energie des Systems sich von ihrem Anfangswerte Q bis zu ihrem Endwerte Q' ändert, so können wir schreiben:

$$Q' = Q + \frac{1}{2} \Sigma \{ (E' - E) (P' + P) \} \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

und daraus ergibt sich das

Theorem II.

Der Zuwachs der Energie des Systems ist die halbe Summe der Produkte aus dem Zuwachs der Ladung jedes Leiters in die Summe seiner Potentiale am Anfang und Ende des Prozesses.

33. Wenn alle Ladungen bis auf eine konstant erhalten werden (durch Isolation der Leiter), so reduziert sich die Gleichung (2) auf

$$Q' - Q = (E' - E) \frac{1}{2} (P' + P),$$

oder

$$\frac{Q' - Q}{E' - E} = \frac{1}{2} (P' + P) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Wenn der Zuwachs der Ladung immer kleiner und kleiner genommen wird, bis er zuletzt verschwindet, so wird P' gleich P und die Gleichung kann so interpretiert werden:

Das Verhältnis der Zunahme der elektrischen Energie eines Leiters zu der Zunahme der Ladung, von welcher sie herrührt, ist numerisch gleich dem Potential dieses Leiters.

In der Bezeichnungsweise der Differentialrechnung wird dieses Resultat durch die Gleichung

$$\frac{dQ_e}{dE} = P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

dargestellt, bei welcher man sich erinnern muss, dass alle Ladungen bis auf eine konstant erhalten werden.

34. Kehren wir zur Gleichung (2) zurück, so haben wir schon bewiesen, dass

$$Q = \frac{1}{2} \Sigma (EP) \quad \text{und} \quad Q' = \frac{1}{2} \Sigma (E'P') \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

ist; wir können daher Gleichung (2) schreiben:

$$\frac{1}{2} \Sigma (E'P') = \frac{1}{2} \Sigma (EP) + \frac{1}{2} \Sigma (E'P' - EP + E'P - EP') \quad . \quad (6)$$

Streichen wir aus dieser Gleichung die Glieder, welche sich gegenseitig aufheben, so erhalten wir

$$\Sigma (EP') = \Sigma (E'P) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

oder in Worten

Theorem III.

In einem festen System von Leitern ist die Summe der Produkte aus der Anfangsladung und dem Endpotential jedes Leiters gleich der Summe der Produkte aus der Endladung und dem Anfangspotential.

Dieses Theorem entspricht in der elementaren Behandlung der Elektrostatik Greens Theorem in der analytischen Theorie. Wenn wir den Anfangs- und Endzustand des Systems passend wählen, können wir eine Reihe von Resultaten ableiten, welche uns später von Nutzen sein werden.

35. Zuerst können wir, wie früher, schreiben

$$\frac{1}{2} \Sigma \{(E' - E)(P' + P)\} = \frac{1}{2} \Sigma (E'P' - EP + E'P - EP') \quad (8)$$

Addieren und subtrahieren wir die gleichen Größen der Gleichung (7)

$$0 = \Sigma (EP' - E'P), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

so wird die rechte Seite

$$\frac{1}{2} \Sigma (E'P' - EP - E'P + EP') \quad . \quad . \quad (10)$$

also

$$\frac{1}{2} \Sigma \{(E' - E)(P' + P)\} = Q' - Q = \frac{1}{2} \Sigma \{(E' + E)(P' - P)\} \quad (11)$$

oder in Worten

Theorem IV.

Der Zuwachs an Energie eines festen Systems von Leitern ist gleich der halben Summe der Produkte aus der Zunahme des Potentials jedes Leiters in die Summe der Anfangs- und Endladungen dieses Leiters.

36. Wenn alle Leiter bis auf einen auf konstanten Potentialen erhalten werden (was man erreichen kann, wenn man sie mit Volta'schen Batterien von konstanter elektromotorischer Kraft verbindet), so reduziert sich die Gleichung (11) auf

$$Q' - Q = \frac{1}{2} (E' + E)(P' - P) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

oder

$$\frac{Q' - Q}{P' - P} = \frac{1}{2}(E' + E). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Wenn der Zuwachs des Potentials immer kleiner und kleiner genommen wird, bis er schliesslich verschwindet, wird E' zuletzt gleich E und die Gleichung kann folgendermassen interpretiert werden:

Das Verhältniss der Zunahme der elektrischen Energie, welche von der Zunahme des Potentials eines der Leiter herrührt, zu dieser Zunahme des Potentials, ist numerisch gleich der Ladung dieses Leiters.

In der Bezeichnung der Differentialrechnung wird dieses Resultat durch die Gleichung

$$\frac{dQ_P}{dP} = E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

ausgedrückt, wobei man sich erinnern muss, dass alle Potentiale bis auf eines konstant erhalten werden.

37. Wir haben nun weiter einige Resultate anzugeben, welche aus Theorem III. abgeleitet werden können.

Wenn irgend ein Leiter, z. B. A_t , isoliert ist und sowohl bei Beginn des Prozesses als im Endzustande ohne Ladung ist, dann ist $E_t = 0$ und $E'_t = 0$, und daher

$$E_t P'_t = 0 \quad \text{und} \quad E'_t P_t = 0, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

so dass die Ausdrücke, die von A_t herrühren, in beiden Gliedern der Gleichung (7) verschwinden.

Ferner, wenn irgend ein Leiter, z. B. A_u , sowohl im Anfangszustande als im Endzustande mit der Erde verbunden ist, ist $P_u = 0$ und $P'_u = 0$, so dass

$$E_u P'_u = 0 \quad \text{und} \quad E'_u P_u = 0,$$

so dass auch in diesem Falle die von A_u abhängenden Glieder auf beiden Seiten der Gleichung (7) verschwinden.

Wenn daher alle Leiter, mit Ausnahme von zweien, z. B. A_r und A_s , entweder isoliert und ohne Ladung, oder mit der Erde verbunden sind, reduziert sich die Gleichung (7) auf die Form

$$E_r P'_r + E_s P'_s = E'_r P_r + E'_s P_s. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Nehmen wir zuerst an, dass im Anfangszustande alle Leiter mit Ausnahme von A_r ohne Ladung sind und dass im Endzustande alle Leiter ausser A_s ohne Ladung sind. Dann wird die Gleichung

$$E_r P'_r = E'_s P_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

oder

$$\frac{P_s}{E_r} = \frac{P'_r}{E'_s}$$

oder in Worten

Theorem V.

In einem Systeme fester isolierter Leiter ist das auf einem Körper A_s durch eine Ladung E hervor-gebrachte Potential P_s , wenn diese Ladung auf dem Leiter A_r sich befindet, gleich dem Potential P_r' , das auf A_r durch eine gleiche Ladung E hervor-gebracht wird, wenn diese Ladung sich auf A_s befindet.

Das ist das erste Beispiel einer reciproken Beziehung zwischen zwei Körpern, welchem wir begegnet sind. Es gibt viele solche reciproke Beziehungen. Sie begegnen uns in jedem Zweige unser Wissenschaft und sie setzen uns oft in den Stand, die Lösung neuer elektrischer Probleme aus den Lösungen einfacherer Probleme, mit welchen wir bereits vertraut sind, abzuleiten. Wenn wir z. B. das Potential kennen, welches eine elektrisierte Kugel auf einen Punkt in ihrer Umgebung ausübt, so können wir daraus die Wirkung ableiten, welche ein kleiner elektrischer Körper, der an diesen Punkt gebracht ist, auf die Vergrößerung des Potentials der Kugel ausüben würde.

38. Nehmen wir weiter an, daß P_s das ursprüngliche Potential von A_s ist, und daß alle anderen Leiter auf dem Potential Null gehalten werden, indem man sie mit den Wänden des Raumes verbindet, ferner sei P_r' das Endpotential von A_r , während das aller anderen Null ist, dann werden in Gleichung (7) alle Terme verschwinden, welche die Potentiale Null enthalten, und wir werden in diesem Falle auch haben

$$E_r P_r' = E_s' P_s (18)$$

Wenn daher

$$P_r' = P_s \text{ ist, so ist } E_r = E_s'. (19)$$

oder in Worten

Theorem VI.

In einem Systeme fester Leiter, die alle, bis auf einen, mit den Wänden des Zimmers in Verbindung sind, ist die Ladung (E_r), die auf A_r induziert wird, wenn A_s auf das Potential P_s gebracht ist, gleich der Ladung (E_s'), die auf A_s induziert wird, wenn A_r auf ein gleiches Potential (P_r') gebracht ist.

39. Als dritten Fall nehmen wir an, daß alle Leiter erst isoliert und ohne Ladung sind, und daß dem Leiter A_r eine Ladung mitgeteilt wird, welche sein Potential auf P_r und das von A_s auf P_s bringt. Nun werde A_s mit der Erde verbunden und eine Ladung E_r' auf A_r induziere die Ladung E_s' auf A_s .

In Gleichung (16) haben wir dann $E_r = 0$ und $P_s' = 0$, so daß die Glieder auf der linken Seite verschwinden, und die Gleichung wird

$$0 = E_r' P_r + E_s' P_s (20)$$

oder

$$\frac{P_s}{P_r} = - \frac{E_r'}{E_s'} .$$

Wenn daher

$$P_s = n P_r \text{ ist, so ist } E_r' = - n E_s' (21)$$

oder in Worten

Theorem VII.

Wenn in einem Systeme von festen isolierten Leitern, die zu Anfang ohne Ladung sind, dem Leiter A_r eine Ladung mitgeteilt wird, welche sein Potential auf P_r bringt (welches als Einheit gelten möge) und das von A_s auf n , dann wird, wenn in demselben Systeme von Leitern dem Leiter A_s eine Einheit der Ladung mitgeteilt wird und A_r mit der Erde verbunden ist, die auf A_r induzierte Ladung gleich $- n$ sein.

Wenn wir anstatt der Annahme, daß die anderen Leiter A_t u. s. w. alle isoliert und ohne Ladung sind, angenommen hätten, daß einige von ihnen oder alle mit der Erde verbunden sind, so würde das Theorem doch richtig sein, nur der Wert von n würde ein anderer sein, je nach dem Arrangement, das wir anwenden.

Dies ist einer von Greens Sätzen. Als ein Beispiel für seine Anwendung wollen wir annehmen, daß wir die Verteilung der elektrischen Ladung bestimmt hätten, welche auf den verschiedenen Teilen der Oberfläche eines Leiters durch einen kleinen elektrischen Körper in gegebener Lage mit der Einheit der Ladung induziert wird. Dann können wir mittels dieses Theorems folgendes Problem lösen. Gegeben sei das Potential an jedem Punkte einer Oberfläche, deren Lage mit der des Leiters zusammenfällt; man soll das Potential an einem Punkte bestimmen, der der Lage des kleinen elektrischen Körpers entspricht.

Wenn daher das Potential an allen Punkten einer geschlossenen Oberfläche bekannt ist, so kann man es für irgend einen Punkt innerhalb dieser Oberfläche bestimmen, wenn kein elektrischer Körper innen sich befindet, und ebenso für jeden Punkt außerhalb, wenn kein elektrischer Körper außerhalb vorhanden ist.

Die von den elektrischen Kräften während der Verschiebung eines Systems von elektrisierten isolierten Leitern geleistete mechanische Arbeit.

40. Es seien $A_1, A_2 \dots$ die Leiter, $E_1, E_2 \dots$ ihre Ladungen, welche, wenn die Leiter isoliert sind, konstant bleiben, $P_1, P_2 \dots$ seien ihre Potentiale vor der Verschiebung und $P_1', P_2' \dots$ dieselben nach der Verschiebung. Dann ist die elektrische Energie des Systems vor der Verschiebung

$$Q = \frac{1}{2} \Sigma (EP) \dots \dots \dots (22)$$

Während der Verschiebung leisten die elektrischen Kräfte, welche in derselben Richtung wie die Verschiebung wirken, Arbeit, deren Betrag gleich W ist und die in dem Systeme übrig bleibende Energie ist

$$Q' = \frac{1}{2} \Sigma (EP') \dots \dots \dots (23)$$

Die Anfangsenergie ist so umgewandelt in die Arbeit W und die Endenergie Q' , so daß die Gleichung der Energie ist

$$Q = W + Q' \dots \dots \dots (24)$$

oder

$$W = \frac{1}{2} \Sigma [E(P - P')] \dots \dots \dots (25)$$

Dieser Ausdruck gibt die während irgend einer, kleinen oder großen, Verschiebung eines isolierten Systems geleistete Arbeit. Um die Kraft zu finden, müssen wir die Verschiebung so klein annehmen, daß die Konfiguration des Systems dadurch nicht merklich geändert wird. Der Grenzwert des Quotienten, den man findet, indem man die Arbeit durch die Verschiebung dividiert, ist der Wert der Kraft, genommen in der Richtung der Verschiebung.

Die von den elektrischen Kräften während der Verschiebung eines Systems von Leitern geleistete Arbeit, wenn jeder Leiter auf konstantem Potential gehalten wird.

41. Beginnen wir damit, daß wir annehmen, jeder Leiter des Systems sei isoliert und daß dem System eine kleine Verschiebung gegeben würde, durch welche das Potential sich änderte von P bis P_1 . Die während dieser Verschiebung geleistete Arbeit ist, wie wir gesehen haben,

$$Q = \frac{1}{2} \Sigma [E(P - P_1)] \dots \dots \dots (26)$$

Nun halten wir die Leiter fest, während wir ihre Ladungen von E bis E_1 ändern, so daß wir den Wert des Potentials von P_1 auf P zurückbringen. Dann wissen wir aus Gleichung (7), daß

$$\Sigma (EP - E_1 P_1) = 0 \dots \dots \dots (27)$$

Wenn wir daher in Gleichung (26) für $\Sigma (EP)$ eintragen $\Sigma (E_1 P_1)$, so kommt

$$W = \frac{1}{2} \Sigma [(E_1 - E) P]. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

Führen wir diese beiden Operationen abwechselnd eine beliebige Anzahl Male aus, und unterscheiden wir jedes Paar von Operationen durch ein Suffix, so finden wir die ganze Arbeit

$$W = W_1 + W_2 + \dots \text{u. s. w.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

$$= \frac{1}{2} \Sigma [(E_1 - E) P_1] + \frac{1}{2} \Sigma [(E_2 - E_1) P_2] + \dots \text{u. s. w.} \quad (30)$$

Machen wir jede Teilverschiebung klein genug, so kommen die Werte von $P_1 P_2 \dots$ unbegrenzt näher an P , den konstanten Wert des Potentials, und der Ausdruck wird:

$$W = \frac{1}{2} \Sigma [(E_1 - E) P] + \frac{1}{2} \Sigma [(E_2 - E_1) P + \dots \text{u. s. w.} \dots \\ + \frac{1}{2} \Sigma [(E' - E_{n-1}) P] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

wo E' der Wert von E nach der letzten Operation ist. Das Endresultat ist daher:

$$W = \frac{1}{2} \Sigma [(E' - E) P]. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

und dieser Ausdruck gibt die Arbeit an, welche während einer Verschiebung von beliebiger Gröfse geleistet wird, wenn das Potential eines jeden Leiters in dem Systeme während der Verschiebung konstant erhalten wird.

Wir können dieses Resultat schreiben

$$W = \frac{1}{2} \Sigma (E' P) - \frac{1}{2} \Sigma (EP) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

oder

$$W = Q' - Q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

also die von den elektrischen Kräften geleistete Arbeit ist gleich dem Zuwachs der elektrischen Energie während der Verschiebung, wenn das Potential jedes Leiters konstant erhalten wird. Als die Ladung jedes Leiters konstant gehalten wurde, war die geleistete Arbeit gleich der Abnahme der Energie des Systems.

Wenn daher das Potential jedes Leiters während einer Verschiebung konstant erhalten wird, bei welcher eine Menge Arbeit, W , geleistet wird, so müssen die Voltaschen Batterieen, welche dazu gebraucht werden, um das Potential konstant zu erhalten, Arbeit leisten, deren Betrag gleich $2W$ ist. Von dieser dem Systeme zugeführten Energie wird die Hälfte zur Vermehrung der Energie des Systems aufgewendet, die andere Hälfte erscheint als mechanische Arbeit.

Viertes Kapitel.

Das elektrische Feld.

42. Wir haben gesehen, daß, wenn ein elektrischer Körper sich im Innern eines leitenden Gefäßes befindet, daß dann die gesamte Elektrizität der inneren Fläche des umschließenden Gefäßes unveränderlich der Größe nach gleich, aber entgegengesetzter Art ist, wie die des Körpers. Dies ist richtig, wie groß auch das Gefäß sein mag. Es kann das Gefäß auch ein Raum von irgend einer Gestalt sein, der seinen Boden, seine Wände, seine Decke aus leitendem Stoff hat. Seine Grenzen können weiter hinausgeschoben werden, sie können aus der Oberfläche der Erde, aus Baumzweigen, aus Wolken, vielleicht aus den äußersten Grenzen der Atmosphäre oder des Universums bestehen. In jedem Falle, wo wir auch einen elektrischen, isolierten Körper finden, sind wir sicher an den Grenzen des isolierenden Mediums, wo sie auch sein mögen, einen gleichen Betrag von Elektrizität entgegengesetzter Art zu finden.

Diese Korrespondenz der Eigenschaften zwischen den beiden Grenzen des isolierenden Mediums führt uns dazu, den Zustand dieses Mediums selbst zu untersuchen, um den Grund zu finden, warum die Elektrizitäten an dessen innerer und äußerer Begrenzung in dieser Beziehung zu einander stehen. Indem wir so unsere Aufmerksamkeit auf den Zustand des isolierenden Mediums richten und sie nicht auf den inneren Leiter und die äußere Oberfläche beschränken, folgen wir dem Wege, welcher Faraday zu vielen seiner elektrischen Entdeckungen leitete.

43. Um unsere Vorstellungen mehr zu fixieren, wollen wir damit beginnen, daß wir einen leitenden, positiv elektrisierten und isolierten Körper in einem hohlen leitenden Gefäß annehmen. Der Raum zwischen dem Körper und dem Gefäß ist mit Luft oder irgend einem andren isolierenden Medium gefüllt. Wir nennen es ein iso-

lierendes Medium, wenn wir nur die Eigenschaft betrachten, daß es die Ladung an der Oberfläche des elektrischen Körpers zurückhält. Wenn wir aber das Medium in der Hinsicht betrachten, daß es einen wesentlichen Anteil an der Erzeugung der elektrischen Erscheinungen hat, werden wir Faradays Ausdruck brauchen und es ein dielektrisches Medium nennen. Endlich, wenn wir den von dem Medium eingenommenen Raum als einen Teil des Raumes betrachten, in welchem elektrische Phänomene beobachtet werden können, wollen wir diesen Raum das elektrische Feld nennen. Wenn wir diesen letzten Ausdruck brauchen, sind wir nicht gezwungen uns die Art und Weise deutlich vorzustellen, wie das dielektrische Medium an den Erscheinungen Teil nimmt. Wenn wir später eine Theorie der Wirkung des Mediums werden bilden wollen, werden wir den Ausdruck „dielektrisch“ von Nutzen finden.

Untersuchung des elektrischen Feldes.

Experiment XI.

α) Untersuchung mittels eines kleinen elektrischen Körpers.

44. Man elektrisiere einen kleinen, runden Körper, z. B. ein vergoldetes Kügelchen aus Mark und bringe es an einem weißen Seidenfaden in irgend einen Teil des Feldes. Wenn die Kugel in der Weise aufgehängt ist, daß die Spannung des Fadens gerade dem Gewicht der Kugel die Wage hält, dann wird die Kugel, wenn sie in das elektrische Feld gebracht ist, sich unter der Wirkung einer neuen Kraft bewegen, einer Kraft, die durch die Wirkung der elektrischen Kugel auf den elektrischen Zustand des Feldes sich entwickelt. Diese neue Kraft sucht die Kugel in einer gewissen Richtung zu bewegen, welche die Richtung der elektromotorischen Kraft genannt wird.

Wenn die Ladung der Kugel geändert wird, so ist die Kraft wesentlich proportional der Ladung, vorausgesetzt, daß diese Ladung nicht so stark ist, daß sie hinreicht, um eine merkliche Störung in dem Zustande der Elektrisierung des Systemes hervorzubringen. Wenn die Ladung positiv ist, so geht die Kraft, welche auf die Kugel wirkt, überall, von dem positiv elektrischen Körper und nach den negativ elektrischen Wänden des Raumes. Wenn die Ladung negativ ist, wirkt die Kraft in der entgegengesetzten Richtung.

Da also die Kraft, welche auf die Kugel wirkt, zum Teil abhängt von der Ladung der Kugel und zum Teil von ihrer Lage und der Elektrisierung des Systemes, ist es zweckmäßig, diese Kraft als das

Produkt zweier Faktoren aufzufassen, von welchen der eine die Ladung der Kugel ist, während der andere die elektromotorische Kraft an dem Punkte des Feldes ist, welcher von dem Mittelpunkte der Kugel eingenommen ist.

Diese elektromotorische Kraft an dem Punkte ist nach Gröfse und Richtung bestimmt. Ein positiv geladener Körper strebt, wenn er dorthin gebracht ist, sich in der positiven Richtung der die Kraft darstellenden Linie zu bewegen. Ein negativ geladener Körper strebt sich in der entgegengesetzten Richtung zu bewegen.

Experiment XII.

β) Untersuchung mittels zweier Scheiben.

45. Aber die elektromotorische Kraft strebt nicht nur elektrisierte Körper zu bewegen, sie strebt auch Elektrizität von einem Teile eines Körpers nach einem anderen zu übertragen.

Man nehme zwei kleine, gleich dünne Metallscheiben, die an Griffen aus Schellack oder Ebonit befestigt sind; man entlade sie und

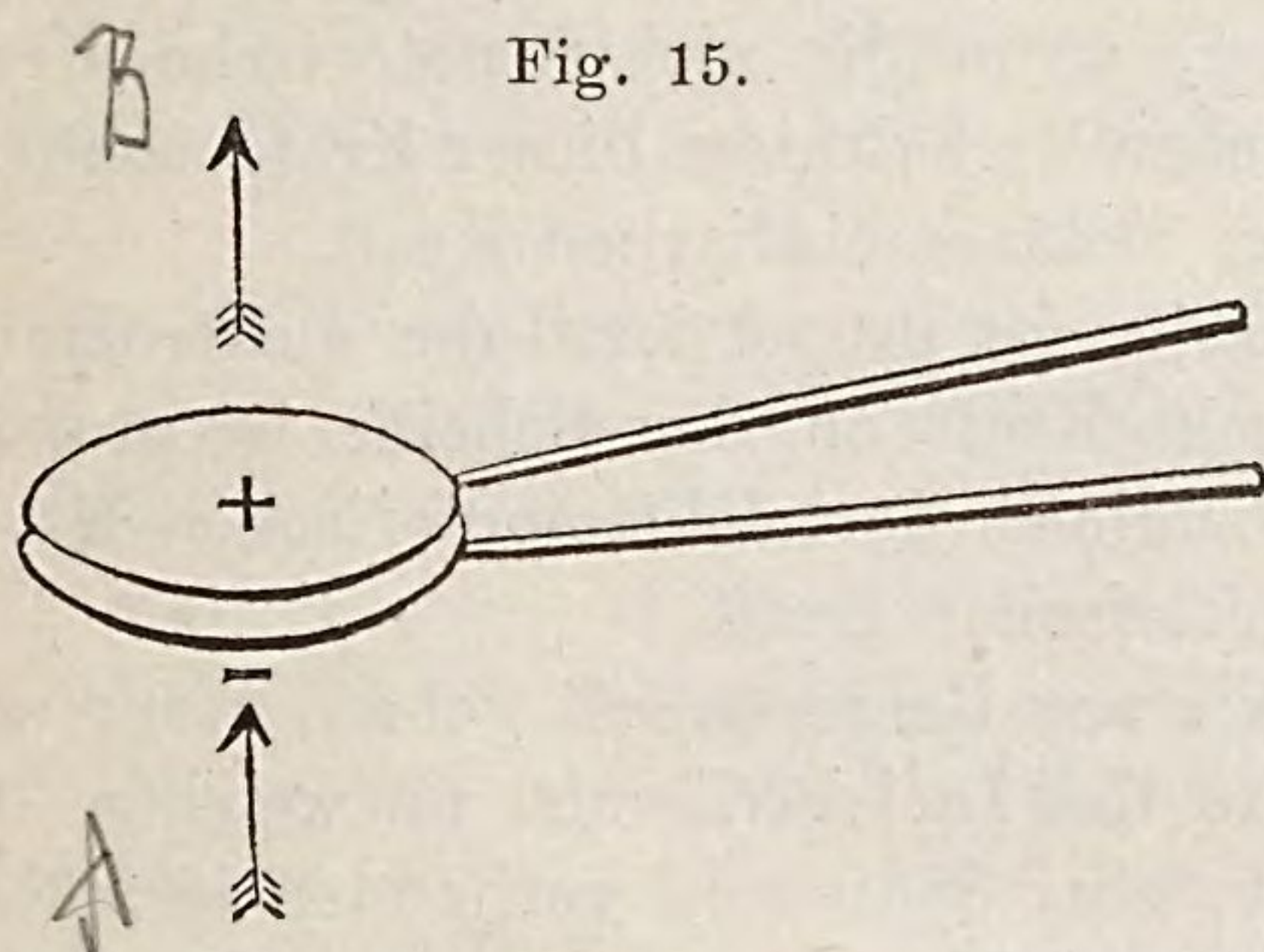


Fig. 15.

bringe sie nebeneinander in das elektrische Feld, so daß ihre Ebenen senkrecht zu der Richtung der elektromotorischen Kraft sind. Man bringe sie in Kontakt, trenne sie dann und nehme sie heraus und prüfe dann erst die eine, dann die andere Scheibe, indem man sie in das hohle Gefäß von Experiment VII bringt. Man wird finden, daß beide

Scheiben geladen sind, und daß, wenn die elektromotorische Kraft in der Richtung AB wirkt, die Scheibe auf der Seite A negativ und die auf der Seite B positiv geladen ist, während der numerische Wert dieser Ladungen gleich ist. Dies beweist, daß hier wirklich eine Übertragung von Elektrizität von der einen Scheibe zur anderen stattgefunden hat, und daß die Richtung dieser Übertragung die der elektromotorischen Kraft ist. Dieses Experiment mit zwei Scheiben liefert eine noch viel zweckmäßigere Methode, um die elektromotorische Kraft an einem Punkte zu messen, als das Experiment mit dem geladenen Markkugeln. Die Messung kleiner Kräfte ist immer eine schwierige Operation und wird fast unmöglich, wenn das Gewicht des Körpers, auf den die Wirkung ausgeübt wird, eine störende Kraft bil-

det, welche erst durch richtig angebrachte Gegengewichte beseitigt werden muß. Die Messung der Ladungen der Scheiben andererseits ist viel einfacher.

Die beiden Scheiben können, wenn sie in Berührung miteinander sind, als eine einzige Scheibe angesehen werden und die Thatsache, daß man, wenn sie getrennt werden, findet, daß sie gleiche und entgegengesetzte Ladungen angenommen haben, beweist, daß, während die Scheiben in Kontakt waren, eine Verteilung der Elektrizität zwischen ihnen stattgefunden hat, da die Elektrisierung jeder Scheibe entgegengesetzt der des in ihrer Nähe befindlichen Körpers ist, sei es des isolierten Körpers, welcher positiv geladen ist, sei es der inneren Oberfläche des umgebenden Gefäßes, welches negativ geladen ist.

Elektrische Spannung.

46. Die beiden Scheiben streben, wenn sie in Berührung gebracht sind, sich voneinander zu trennen und sich den entgegengesetzt elektrischen Oberflächen zu nähern, denen sie gegenüber stehen. Die Kraft, mit welcher sie sich zu trennen streben, ist proportional der Fläche der Scheiben und wächst, wenn die elektromotorische Kraft wächst, aber nicht in dem einfachen Verhältnisse dieser Kraft, sondern im Verhältnisse des Quadrats der elektromotorischen Kraft.

Die Elektrisierung jeder Scheibe ist proportional der elektromotorischen Kraft und die mechanische Kraft an der Scheibe ist proportional ihrer Elektrisierung und zugleich der elektromotorischen Kraft, d. h. dem Quadrat der elektromotorischen Kraft.

Von dieser Kraft können wir uns Rechenschaft geben, wenn wir annehmen, daß an jedem Punkte des Dielektrikums, an welchem die elektromotorische Kraft existiert, eine Spannung vorhanden ist, ähnlich der Spannung eines gedehnten Seiles, eine Spannung, die in der Richtung der elektromotorischen Kraft wirkt und die proportional ist dem Quadrat der elektromotorischen Kraft an diesem Punkte. Diese Spannung wirkt nur an der Außenseite jeder Scheibe, und nicht an der Seite, welche der anderen Scheibe zugekehrt ist, denn in dem Raume zwischen den Scheiben ist keine elektromotorische Kraft, folglich auch keine Spannung vorhanden.

Der Ausdruck elektrische Spannung ist von verschiedenen Autoren in verschiedenem Sinne gebraucht worden. In diesem Werke wollen wir ihn immer in dem oben erklärten Sinne gebrauchen, — die Spannung von so und so viel Pfund oder Gramm Gewicht auf den Quadratfuß, ausgeübt von der Luft oder einem anderen dielektrischen Medium in der Richtung der elektromotorischen Kraft.

Experiment XIII.

Coulombs Probescheibchen.

47. Wenn eine von diesen Scheiben mit einer ihrer ebenen Flächen mit der Oberfläche eines elektrischen Leiters in Berührung gebracht und dann von ihr entfernt wird, so findet man sie geladen. Wenn die Scheibe sehr dünn ist und wenn die elektrische Oberfläche so nahezu eben ist, daß nahezu die ganze Fläche der Scheibe an ihr anliegt, so wird die Ladung der Scheibe nahezu gleich der Ladung des Teiles der elektrischen Fläche sein, welchen sie bedeckte. Wenn die Scheibe dick ist oder nicht ganz eng an der elektrischen Oberfläche anliegt, so wird ihre Ladung beim Entfernen etwas größer sein.

Diese Methode, die Dichtigkeit der Elektrizität auf einer Oberfläche zu bestimmen, war von Coulomb eingeführt und man nennt die Scheibe, wenn sie zu diesem Zwecke gebraucht wird, Coulombs Probescheibe.

Die Ladung der Scheibe ist nach Experiment XII. proportional der elektromotorischen Kraft an der elektrischen Oberfläche. Daher ist die elektromotorische Kraft dicht an einer leitenden Oberfläche proportional der Dichtigkeit der Elektrizität an diesem Teile der Oberfläche.

Da die Oberfläche des Leiters eine Fläche gleichen Potentials ist, ist die elektromotorische Kraft senkrecht zu ihr. Die Thatsache, daß die elektromotorische Kraft an einem Punkte ganz nahe an der Oberfläche eines Leiters senkrecht zu dieser Oberfläche und proportional der Dichtigkeit der Elektrizität an diesem Punkte ist, diese Thatsache wurde zuerst von Coulomb experimentell festgestellt und wird im allgemeinen als Coulombsches Gesetz angeführt.

Um zu beweisen, daß, wenn die Probescheibe mit der Oberfläche des Leiters zusammenfällt, daß dann die Ladung der Probescheibe, wenn sie von dem elektrischen Leiter entfernt wird, gleich der Ladung an dem Teil der Oberfläche ist, welchen sie bedeckt, um dies zu beweisen, können wir folgendes Experiment anstellen.

Eine Kugel, deren Radius 5 ist (eine beliebige Längeneinheit vorausgesetzt), wird auf ein isolierendes Gestell gesetzt. Ein Segment einer dünnen Kugelschale wird an einem isolierenden Griff befestigt. Der Radius der sphärischen Oberfläche dieser Schale ist 5, der Durchmesser des Kreisrandes des Segments ist 8 und die Höhe des Segments ist 2. Wenn sie auf die Kugel gelegt wird, bedeckt sie ein Fünftel von deren Oberfläche. Eine zweite Kugel, deren Radius auch 5 ist, wird auf einen isolierenden Ring gelegt.

Die erste Kugel wird elektrisiert, das Segment mit ihr in Kontakt gebracht und dann entfernt. Die zweite Kugel wird dann mit der ersten in Berührung gebracht, dann entfernt und entladen, und dann wieder mit der ersten in Berührung gebracht. Darauf wird das Segment in ein leitendes Gefäß gesetzt, welches zur Erde abgeleitet ist. Dies wird dann isoliert und das Segment entfernt. Bringt man nun endlich eine von den Kugeln mit der Außenseite des Gefäßes in Berührung, so findet man sie ganz entladen.

Es sei e die Elektrizitätsmenge auf der ersten Kugel und die durch das Segment fortgenommene Ladung sei ne , dann ist die auf der Kugel übrig bleibende Ladung $(1 - n)e$. Die Ladung der ersten Kugel wird dann mit auf die zweite Kugel verteilt und wird $\frac{1}{2}(1 - n)e$. Die zweite Kugel wird dann entladen und die Ladung wieder geteilt, so daß die Ladung auf jeder Kugel $\frac{1}{4}(1 - n)e$ ist. Die Ladung des isolierten Gefäßes ist gleich und entgegengesetzt der des Segments, also $-ne$ und diese wird vollkommen durch die Ladung einer der Kugeln neutralisiert. Es ist also

$$\frac{1}{4}(1 - n)e + (-ne) = 0,$$

woraus wir finden

$$n = \frac{1}{5}.$$

Also die von dem Segment, welches den fünften Teil der Kugeloberfläche bedeckt, mitgenommene Elektrizitätsmenge ist ein Fünftel von der ganzen Ladung der Kugel.

Experiment XIV.

Richtung der elektromotorischen Kraft an einem Punkte.

48. Eine zweckmäßige Methode, um die Richtung der elektromotorischen Kraft zu bestimmen, ist die, daß man einen schmalen länglichen Leiter mit seinem Mittelpunkt an den gegebenen Punkt des Feldes bringt. Die beiden Enden des kurzen Leiters werden entgegengesetzt elektrisch und daher von der elektromotorischen Kraft in entgegengesetzten Richtungen gezogen, so daß die Achse des Leiters sich von selbst in die Richtung der Kraft an diesem Punkte einstellen wird. Ein kurzes Stück eines feinen Baumwollen- oder Leinenfadens, durch dessen Mitte eine feine Seidenfaser geht, ist sehr entsprechend. Die Seidenfaser, an beiden Enden gehalten, dient dazu, um das Stück des Fadens in eine gewünschte Lage zu bringen, und der Faden nimmt dann die Richtung der elektrischen Kraft an diesem Punkte ein.

Experiment XV.

Potential an einem Punkte des Feldes.

49. Man hänge zwei kleine ungeladene Metallkugeln an Seiden-drähten in das Feld hinein und verbinde sie mit einem feinen Metall-draht, den man an dem Ende eines Ebonitstabes befestigt hat. Man entferne dann den Draht und nachher die Kugeln einzeln und prüfe die Ladung der Kugeln.

Man wird finden, daß die Kugeln, wenn sie geladen worden sind, gleiche und entgegengesetzte Ladungen angenommen haben. Wenn die Potentiale an den von den Mittelpunkten der Kugeln eingenommenen Stellen verschieden sind, wird positive Elektrizität von der Stelle höheren zu der Stelle niederen Potentials übertragen und die Kugel an der Stelle höheren Potentials wird infolgedessen negativ geladen werden, während die an der Stelle niederen Potentials positiv geladen werden wird. Man kann zeigen, daß diese Ladungen proportional der Potentialdifferenz an diesen beiden Stellen sind.

Wir haben so eine Methode, um Punkte des Feldes zu finden, an welchen das Potential daselbe ist. Man bringe eine von den Kugeln an einen festen Punkt und rücke mit der anderen so lange, bis man, wenn man die Kugeln wie früher mit einem Drahte verbindet, auf beiden Kugeln keine Ladung findet. Dann müssen die Potentiale des Feldes an den von den Mittelpunkten der Kugeln eingenommenen Punkten dieselben sein. Auf diese Weise kann man eine Anzahl von Punkten finden, von denen jeder daselbe Potential hat wie ein gegebener Punkt.

Alle diese Punkte liegen auf einer gewissen Oberfläche, welche man eine Oberfläche gleichen Potentials nennt. Auf einer Seite dieser Oberfläche ist das Potential höher, auf der anderen niedriger als in der Oberfläche selbst. Wir haben gesehen, daß die Elektrizität nicht danach strebt, von einem Teile einer solchen Oberfläche nach einem andern derselben Oberfläche zu fließen. Ein elektrischer Körper, der gezwungen wäre, sich nicht anders als von einem Punkte der Oberfläche nach einem anderen zu bewegen, würde im Gleichgewicht sein und die auf einen solchen Körper wirkende Kraft ist daher überall senkrecht zu der Oberfläche gleichen Potentials.

Experiment XVI.

50. Wir können auch mit einer einzigen Kugel auskommen. Wir bringen sie mit ihrem Mittelpunkte an einen gegebenen Punkt des Feldes und berühren sie für einen Moment mit einem zur Erde abge-

leiteten Draht. Wir nehmen dann die Kugel heraus und bestimmen ihre Ladung. Die Ladung der Kugel ist proportional dem Potential an dem gegebenen Punkte, wobei aber eine positive Ladung einem negativen Potential entspricht.

Oberflächen gleichen Potentials.

51. Auf diese Weise kann man das Potential an einer beliebigen Anzahl von Punkten in dem Felde bestimmen, und man kann sich Oberflächen gleichen Potentials gezogen denken, entsprechend den Werten des Potentials, die durch die Zahlen 1, 2, 3 ausgedrückt werden.

Diese Oberflächen werden eine Reihe bilden, da im allgemeinen jede von ihnen innerhalb der vorhergehenden Oberfläche liegt und die nachfolgende in sich hat. Zwei verschiedene Oberflächen können sich nicht schneiden, obwohl eine spezielle Oberfläche gleichen Potentials aus zwei oder mehr Schalen bestehen kann, die einander in gewissen Linien oder Punkten schneiden.

Die Oberfläche eines Leiters, der in elektrischem Gleichgewicht ist, ist eine Oberfläche gleichen Potentials. Denn wenn das Potential an einem Punkte des Leiters verschieden von dem an einem anderen Punkte ist, so wird die Elektrizität von der Stelle höheren zu der Stelle niedrigeren Potentials fließen, bis die Potentiale gleich geworden sind.

Experiment XVII.

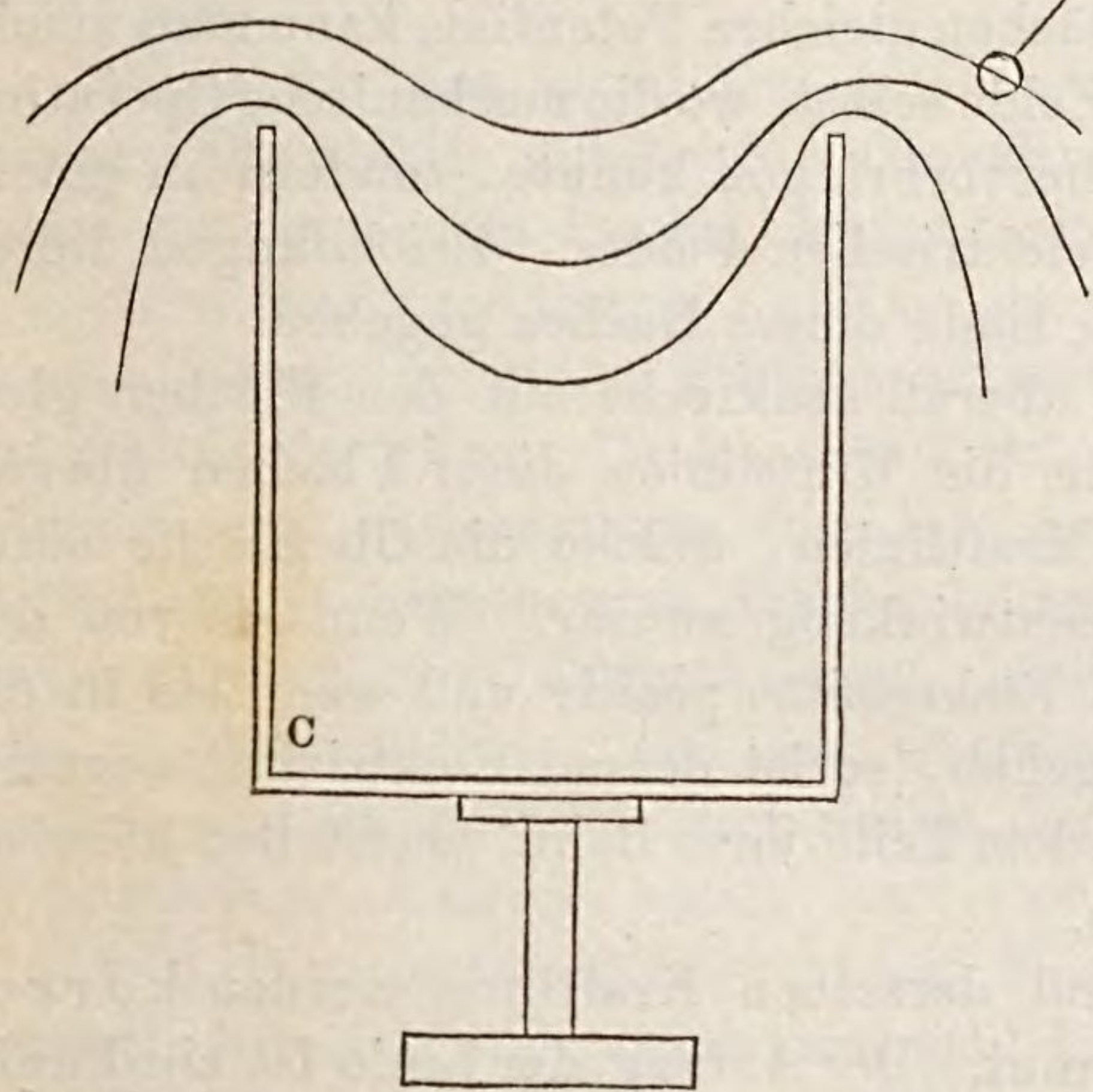
52. Um eine experimentelle Bestimmung der Oberflächen gleichen Potentials, die zu einem elektrischen System gehören, auszuführen, benutzen wir eine kleine Untersuchungskugel, die durch einen feinen Draht beständig mit einer Elektrode des Elektroskops in Verbindung ist, während die andere Elektrode mit der Erde verbunden ist. Man bringe den Mittelpunkt der Kugel an einen gegebenen Punkt und verbinde für einen Augenblick die Elektroden miteinander. Die Angabe des Elektroskops wird so auf Null reduziert. Wenn nun die Kugel so bewegt wird, daß die Angabe des Elektrometers während der Bewegung Null bleibt, so wird die Bahn des Mittelpunkts der Untersuchungskugel auf einer Oberfläche gleichen Potentials liegen, denn wenn sie sich nach einer Stelle höheren Potentials hinbewegt, so wird Elektrizität von der Kugel zum Elektroskop fließen, und wenn sie sich zu einer Stelle niedrigeren Potentials bewegt, so wird Elektrizität von dem Elektroskop zu der Kugel fließen.

Wenn die zu dem elektrischen Systeme gehörenden Körper nicht vollkommen isoliert sind, so werden ihre Potentiale und die der Punkte des Feldes sich der Null zu nähern streben. Der Weg, auf welchem das Zentrum der Untersuchungskugel sich bewegt, ist derart, daß ihr Potential an irgend einem Punkte zu der Zeit, wenn das Zentrum der Kugel durch diesen hindurchgeht, einen gegebenen Wert hat. Die verschiedenen Punkte der Bahn liegen daher nicht auf einer Oberfläche, welche in irgend einem beliebigen Augenblick daselbe Potential hat, denn das Potential verkleinert sich allenthalben, und die Bahn muß daher, um diesen Verlust auszugleichen, von Oberflächen niederen zu solchen höheren Potentials gehen.

Experiment XVIII.

53. Die folgende, auf Theorem V, Art. 37 gestützte Methode ist daher in vielen Fällen zweckentsprechender, da es viel leichter ist, für

Fig. 16.



die an einer isolierten Handhabe befestigte Kugel gute Isolation zu sichern, als für einen großen elektrisierten Leiter von unregelmäßiger Form. Es werde verlangt, man solle die Oberflächen gleichen Potentials bestimmen, die von der Elektrisierung des Leiters *C* herrühren, der auf einem isolierten Fusse steht. Man verbinde den Leiter mit einer Elektrode des Elektroskops, während die andere mit der Erde verbunden ist. Dann elektrisiere man die Un-

tersuchungskugel und bringe sie, indem man sie an der isolierten Handhabe faßt, mit ihrem Zentrum an einen gegebenen Punkt. Man verbinde die Elektroden einen Augenblick und bewege dann die Kugel auf einer solchen Bahn, daß die Angabe des Elektroskops Null bleibt. Diese Bahn wird auf einer Oberfläche gleichen Potentials liegen.

Denn nach Theorem V ist der Teil des Potentials des Leiters *C*, welcher von der Gegenwart der geladenen Untersuchungskugel herrührt, deren Mittelpunkt in einem gegebenen Punkte liegt, gleich dem

Potential an dem gegebenen Punkte, welcher von einer Ladung, gleich der der Untersuchungskugel, auf dem Leiter *C* herrührt.

Nach dieser Methode bleibt das Potential des Leiters Null, oder sehr nahezu Null, während der ganzen Zeit des Experiments, so daß ein sehr geringes Streben zur Änderung der Ladung dieses Körpers vorhanden ist. Die Untersuchungskugel andererseits ist auf hohem Potential, aber da sie nicht durch einen Draht mit irgend einem anderen Körper verbunden ist, so kann ihre Isolation sehr gut gemacht werden.

Linien der elektrischen Kraft.

54. Wenn die Richtung der elektrischen Kraft an verschiedenen Punkten des Feldes bestimmt wird, und wenn eine Linie so gezogen wird, daß ihre Richtung an jedem Punkte ihrer Bahn mit der Richtung der elektrischen Kraft an diesem Punkte übereinstimmt, so nennt man eine solche Linie eine Kraftlinie. Zieht man eine Anzahl solcher Linien, so kann man die Richtung der Kraft in verschiedenen Teilen des Feldes zeigen.

Die Kraftlinien und die Flächen gleichen Potentials kann man zeichnen, nicht in dem elektrischen Felde selbst, wo die mechanische Operation des Zeichnens eine Störung hervorbringen könnte, sondern in einem Modell oder einem Plan des elektrischen Feldes. Zeichnungen dieser Art sind in Tafel I bis VI am Ende dieses Buches gegeben.

Da die elektrische Kraft überall senkrecht auf den Flächen gleichen Potentials ist, schneiden die Kraftlinien diese Flächen überall unter rechten Winkeln. Die Kraftlinien, welche die Oberfläche eines Leiters treffen, sind daher rechtwinkelig zu ihr. Wenn sie von der Fläche ausgehen, so ist deren Elektrizität positiv und wenn sie in die Oberfläche des Leiters hineingehen, so ist dessen Elektrizität negativ.

Eine Kraftlinie geht in jedem Teile ihrer Bahn von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials.

Die Endpunkte einer und derselben Kraftlinie werden korrespondierende Punkte genannt. Der Anfang der Linie ist ein Punkt auf einer positiv elektrischen Oberfläche und das Ende der Linie ist ein entsprechender Punkt auf einer negativ elektrischen Oberfläche.

Das Potential der ersten dieser Oberflächen muß höher sein als das der zweiten.

Fünftes Kapitel.

Faradays Gesetz der Induktionslinien.

55. Faraday wendet in seinen elektrischen Untersuchungen die Kraftlinien nicht nur dazu an, um die Richtung der elektrischen Kraft an jedem Punkte des Feldes, sondern auch um die Menge der Elektrizität auf einem gegebenen Teile der elektrischen Oberfläche anzuzeigen.

Wenn wir uns einen Teil einer elektrischen Oberfläche von der übrigen Oberfläche durch eine Grenzlinie abgeschnitten denken und wenn wir von jedem Punkte dieser Grenzlinie eine Kraftlinie ziehen, die wir so weit verlängern, bis sie die Oberfläche irgend eines anderen Körpers in einem Punkte schneidet, welchen man den korrespondierenden Punkt nennt in bezug auf den Punkt des Körpers, von welchem aus die Linie gezogen war, so werden diese Linien eine röhrenförmige Fläche bilden und werden von der Oberfläche des anderen Körpers einen gewissen Teil ausschneiden, der dem ausgeschnittenen Teil der Oberfläche des ersten Körpers entspricht, und die gesamte Elektrizität der beiden entsprechenden Teile ist numerisch an Gröfse gleich, aber von entgegengesetzter Art.

56. Ein spezielles Beispiel von Faradays Gesetz ist das, welches wir bereits durch das Experiment bewiesen haben, nämlich, dafs die Elektrisierung der inneren Fläche eines geschlossenen, leitenden Gefäßes gleich und entgegengesetzt ist der eines in ihm befindlichen elektrischen Körpers. Hier haben wir eine Beziehung zwischen der gesamten Elektrizität der inneren Oberfläche und der der gegenüber liegenden Fläche des inneren Körpers. Faradays Gesetz sagt aus, dafs, wenn man Kraftlinien von der einen Oberfläche zur anderen zieht, man auf den beiden Oberflächen miteinander korrespondierende Punkte finden kann; dafs entsprechende Linien solche sind, dafs ein beliebiger Punkt auf der einen Linie seinen korrespondierenden Punkt

auf der anderen hat, und daß die Elektrisierungen der beiden durch solche entsprechende Linien abgegrenzten Teile der beiden gegenüberliegenden Oberflächen gleich und entgegengesetzt sind.

57. Wir haben diese Linien „Kraftlinien“ genannt, weil wir sie zuerst als Linien definierten, deren Richtung in jedem Punkte mit der der elektrischen Kraft übereinstimmt. Jede Kraftlinie beginnt an einer positiv elektrischen Oberfläche und endet an einer negativ elektrischen Oberfläche und die Punkte dieser Flächen, an welchen sie beginnt und endet, werden korrespondierende Punkte genannt. Ein System von Kraftlinien, welches eine röhrenförmige Fläche bildet, die an dem einen Ende durch einen Teil der positiv elektrischen Oberfläche, an dem anderen Ende durch den entsprechenden Teil der negativen Oberfläche geschlossen ist, wurde von Faraday ein Induktionsfaden genannt, weil elektrische Induktion nach Faraday derjenige Zustand des Dielektrikums ist, durch welchen die Elektrisierungen der gegenüberliegenden Oberflächen in diejenige physikalische Beziehung zu einander treten, welche wir durch den Ausdruck „ihre Elektrizitäten sind gleich und entgegengesetzt“ bezeichnen.

Eigenschaften eines Induktionsfadens.

58. Die Elektrisierung des Teiles der positiv elektrischen Oberfläche, von welchem der Induktionsfaden ausgeht, ist dem Zahlenwerte nach gleich, aber von entgegengesetztem Zeichen, als die negative Elektrisierung des Teiles der Oberfläche, an welcher der Induktionsfaden endet.

Teilen wir die positive Oberfläche in Teile, so daß die Elektrisierung jedes Teiles die Einheit, und ziehen wir für jeden Teil die Fäden, so erhalten wir ein System von Einheitsfäden, welche sehr brauchbar sind, um die elektrischen Einheiten zu beschreiben. Denn in diesem Falle wird die Elektrisierung irgend einer Oberfläche durch die Zahl der Fäden gemessen, welche auf ihr vorhanden sind. Gehen diese von der Oberfläche aus, so ist diese Zahl als Darstellung der positiven Elektrisierung zu nehmen; enden die Fäden an der Oberfläche, so ist die Elektrisierung negativ.

In diesem Sinne ist es auszufassen, wenn Faraday so oft von der Zahl von Kraftlinien spricht, welche zu einer gegebenen Fläche gehören.

Nehmen wir an, daß eine gedachte Fläche in dem elektrischen Felde gezogen ist, dann wird die Gröfse der elektrostatischen Induktion durch diese Fläche hindurch gemessen durch die Zahl der Induktionsfäden, welche durch sie hindurchgehen, und sie wird positiv oder negativ gerechnet, je nachdem die Fäden durch sie in positiver oder negativer Richtung hindurchgehen.

Note: Unter einer gedachten Fläche ist eine Fläche gemeint, welche keine physikalische Existenz hat, die man sich aber als im Raume existierend vorstellen kann, ohne daß sie auf die physikalischen Eigenschaften der Substanz, welche diesen Raum erfüllt, einwirkt. Wir können uns zum Beispiel eine vertikale Ebene vorstellen, welche einen Menschen der Länge nach in zwei gleiche Teile teilt, und vermittelt dieser gedachten Fläche können wir unsere Begriffe über die Form dieser Person präziser machen, obwohl jeder Versuch, diese gedachte Fläche in eine reelle zu verwandeln, unter das Strafgesetz fallen würde.

59. Eine Linie elektrostatischer Induktion geht in jedem Teile ihrer Bahn von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials und zwar immer rechtwinkelig zu den Flächen gleichen Potentials, welche sie schneidet.

Wir haben gesehen, daß das elektrische Feld durch Flächen gleichen Potentials in eine Reihe von Schalen zerlegt wird, ähnlich den Schalen einer Zwiebel, und daß die Dicke jeder Schale an einem Punkte sich umgekehrt wie die elektrische Kraft an diesem Punkte verhält.

Jetzt haben wir das elektrische Feld in ein System von Induktionsfäden geteilt, von denen jeder einer Einheit entspricht, und bei denen der Querschnitt jedes Fadens an einem Punkte sich umgekehrt wie die Intensität der elektrischen Induktion an diesem Punkte ändert.

Jeder von diesen Fäden wird durch die Flächen gleichen Potentials in eine Anzahl von Segmenten geteilt, welche wir Einheitszellen nennen wollen.

60. Nehmen wir den einfachsten Fall, den, daß ein einziger positiv elektrischer Körper innerhalb eines geschlossenen, leitenden Gefäßes sich befindet. Dann beginnen alle Induktionsfäden an dem positiv elektrischen Körper und enden an der negativ elektrischen inneren Fläche des Gefäßes. Die Zahl dieser Fäden ist, da es Einheitsfäden sind, gleich der Zahl der elektrischen Einheiten in der Ladung des elektrischen Körpers. Jeder von ihnen schneidet alle Flächen gleichen Potentials, welche den elektrischen Körper umschließen und von dem Gefäß umschlossen werden. Jeder Faden ist daher in eine Anzahl von Zellen geteilt, welche Anzahl durch die Differenz des Potentials des elektrischen Körpers und des Gefäßes angegeben wird. Ist e die Ladung des Körpers und p sein Potential, sind E und P Ladung und Potential des Gefäßes, so ist die gesamte Anzahl der Zellen

$$e(p - P)$$

oder, da $E = -e$ ist, können wir diesen Ausdruck schreiben

$$ep + EP.$$

Dies ist nun das Doppelte des Ausdrucks, welchen wir früher für die elektrische Energie des Systems erhielten (s. Art. 31). In diesem einfachen Falle ist also die Zahl der Zellen das Doppelte der Zahl der Energieeinheiten in dem System.

Wenn mehrere elektrische Körper vorhanden sind, A, B, C u. s. w., so können die Induktionsfäden, welche von einem dieser Körper, z. B. A , ausgehen, entweder auf die innere Oberfläche des umgebenden Gefäßes treffen, oder auf einen anderen von den elektrischen Körpern.

Es seien E_1, E_2, E_3 die Ladungen von A, B, C und P_1, P_2, P_3 ihre Potentiale, während Ladung und Potential des Gefäßes E_0 und P_0 sind.

Es mögen E_{AB}, E_{AC}, E_{AO} die Zahl der Induktionsfäden bezeichnen, welche von A respektive zu den Leitern B und C und zu dem Gefäß O gehen. Dann wird die gesamte Anzahl der Zellen sein

$$\begin{aligned} E_{AB}(P_1 - P_2) + E_{AC}(P_1 - P_3) + E_{AO}(P_1 - P_0) \\ + E_{BC}(P_2 - P_3) + E_{BO}(P_2 - P_0) \\ + E_{CO}(P_3 - P_0) \end{aligned}$$

Ordnen wir diese Ausdrücke nach den in ihnen enthaltenen Potentialen, und erinnern wir uns, daß, da E_{AB} die Zahl der Fäden bezeichnet, welche von A nach B gehen, E_{BA} die Zahl derer bezeichnen muß, welche von B nach A gehen und daß daher

$$E_{BA} = -E_{AB}$$

ist, so können wir diesen Ausdruck schreiben

$$\begin{aligned} P_1(E_{AB} + E_{AC} + E_{AO}) \\ + P_2(E_{BC} + E_{BO} + E_{BA}) \\ + P_3(E_{CO} + E_{CA} + E_{CB}) \\ + P_0(E_{OA} + E_{OB} + E_{OC}) \end{aligned}$$

Nun ist $E_{AB} + E_{AC} + E_{OA}$ die gesamte Anzahl der Fäden, welche von A ausgehen, und daher ist diese Summe gleich E_1 , der Ladung von A , und ebenso sind die Coefficienten der anderen Potentiale auch die Ladungen der Körper, auf welche sie sich beziehen, so daß der ganze Ausdruck endlich ist:

$$P_0 E_0 + P_1 E_1 + P_2 E_2 + P_3 E_3$$

und das ist die doppelte Energie des Systems.

Ob also ein elektrischer Körper vorhanden ist oder mehrere, immer ist die Zahl der Zellen doppelt so groß wie die Zahl der Einheiten der elektrischen Energie in dem System.

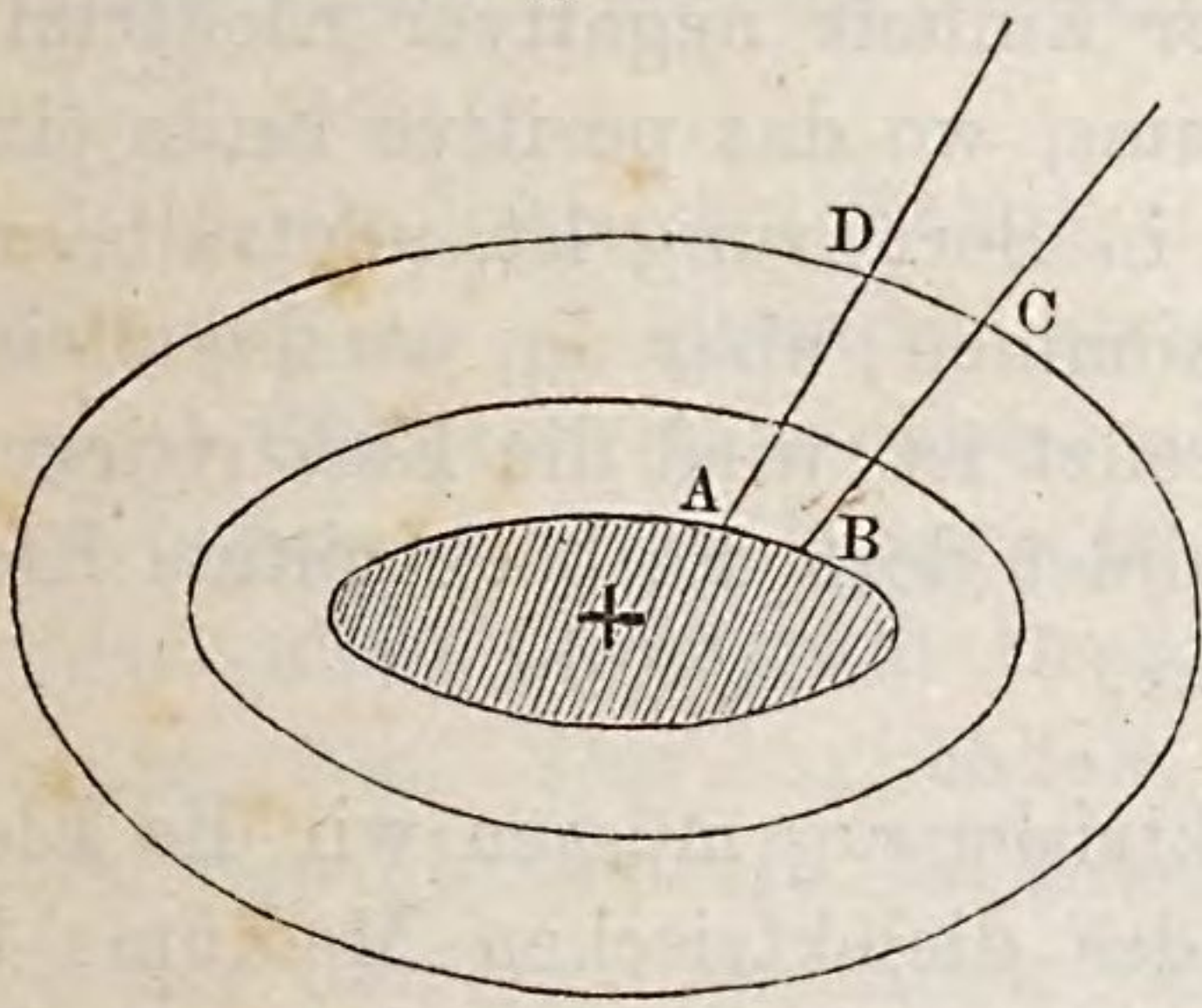
61. Diese bemerkenswerte Beziehung zwischen der Anzahl der Zellen, in welchen die Induktionsfäden von den Flächen gleichen Potentials geschnitten werden, und der elektrischen Energie des Systems

führt uns dazu, zu untersuchen, ob nicht die elektrische Energie in Wirklichkeit ihren Sitz in dem Dielektrium hat, welches auf diese Weise in Zellen zerlegt ist, wobei jede Zelle ein Teil des Mediums ist, in welchem die Hälfte einer Energieeinheit aufgespeichert ist. Wir brauchen nur anzunehmen, daß die elektromotorische Kraft, wenn sie auf ein Dielektrium wirkt, dieses in einen gewissen Zwangszustand versetzt, aus welchem es sich immer selbst zu befreien sucht.

Um unsere Vorstellung von dem, was dabei stattfindet, präziser zu machen, wollen wir eine einzige Zelle betrachten, die zu einem Induktionsfaden gehört, der von einem positiv elektrischen Körper ausgeht. Die Zelle ist begrenzt von zwei aufeinanderfolgenden Flächen gleichen Potentials, die den Körper umgeben.

Wir wissen, daß eine elektromotorische Kraft vorhanden ist, die von dem elektrischen Körper nach außen wirkt. Wenn diese Kraft auf ein leitendes Medium wirken würde, so würde sie dort einen Strom

Fig. 17.



von Elektrizität hervorbringen, der so lange dauern würde, als die Kraft fortfahren würde zu wirken. Unser Medium ist aber ein nichtleitendes oder dielektrisches Medium, und die Wirkung der elektromotorischen Kraft ist die, daß sie eine elektrische Verschiebung, wie wir sagen können, hervorbringt, d. h. die Elektrizität wird nach außen in Richtung der elektromotorischen Kraft gedrängt; aber, wenn die Elektrizität diese Ver-

schiebung erlitten hat, so ist doch ihr Zustand der, daß, sobald die elektromotorische Kraft zu wirken aufgehört hat, sie wieder die Lage einnimmt, welche sie vor der Verschiebung hatte.

Die Größe der elektrischen Verschiebung wird durch die Elektrizitätsmenge gemessen, welche durch eine feste Fläche hindurchgeht, die man sich parallel den Flächen gleichen Potentials gezogen denken kann.

Wir wissen absolut nichts über die Größe des Weges, durch welchen hindurch irgend ein spezieller Teil der Elektrizität von seiner Anfangslage aus verschoben wird. Das einzige, was wir kennen, ist die Menge, welche durch eine gegebene Fläche hindurchgeht. Je größer wir den Betrag von Elektrizität annehmen, der z. B. in einem Kubikzoll vorhanden ist, desto kleiner brauchen wir die Strecke anzunehmen, durch welche sie verschoben ist, damit eine gegebene Elektrizitätsmenge durch eine in dem Medium feste Fläche von einem Quadratzoll Größe hindurch verschoben sein kann. Wahrscheinlich ist es, daß die wirkliche Verschiebung außerordentlich klein ist; in diesem Falle müssen

wir annehmen, daß die in einem Kubikzoll des Mediums vorhandene Elektrizitätsmenge außerordentlich groß ist. Wenn dies faktisch der Fall ist, so kann die wirkliche Geschwindigkeit der Elektrizität in einem Telegraphendrahte sehr klein sein, kleiner z. B. als ein hundertstel Zoll in einer Stunde, obwohl die Signale, welche sie befördert, mit großer Geschwindigkeit fortgepflanzt werden.

62. Die Verschiebung durch einen Querschnitt eines Einheitsinduktionsfadens hindurch ist eine Einheit der Elektrizität und die Richtung der Verschiebung ist die Richtung der elektromotorischen Kraft, nämlich von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials.

Neben der elektrischen Verschiebung innerhalb der Zelle haben wir noch den Zustand der beiden Enden der Zelle, welche von Flächen gleichen Potentials gebildet werden, zu betrachten. Wir müssen annehmen, daß in jeder Zelle die von der Fläche höheren Potentials gebildete Endfläche mit einer Einheit positiver Elektrizität belegt ist, während die gegenüberliegende Endfläche, die von der Fläche mit niederm Potential gebildet ist, mit einer Einheit negativer Elektrizität belegt ist. In dem Inneren des Mediums, wo das positive Ende einer Zelle mit dem negativen der nächsten in Berührung ist, neutralisieren sich diese beiden Elektrisierungen vollkommen; aber da, wo das dielektrische Medium von einem Leiter begrenzt ist, wird die Elektrisierung nicht mehr neutralisiert, sondern sie bildet dort die beobachtete Elektrisierung an der Oberfläche des Leiters.

Nach dieser Auffassung der Elektrisierung müssen wir die Elektrisierung eher als eine Eigenschaft des dielektrischen Mediums betrachten, statt als eine Eigenschaft des Leiters, welche von ihm begrenzt ist.

63. Wenn wir weiter annehmen, daß in jedem Teile eines dielektrischen Mediums, durch welches hindurch elektrische Induktion stattfindet, ein Zug, ähnlich dem eines Seiles, in der Richtung der Kraftlinien herrscht und ein Druck in allen Richtungen, die rechtwinkelig zu den Kraftlinien sind, so können wir alle mechanischen Wirkungen, welche zwischen elektrischen Körpern stattfinden, erklären.

Die auf die Einheit der Fläche bezogene Spannung ist proportional dem Quadrat der elektromotorischen Kraft an diesem Punkte. Der Druck hat denselben Zahlenwert, hat aber natürlich entgegengesetztes Zeichen.

In meinem grösseren Werke über Elektrizität ist der Beweis dafür gegeben, daß ein System von Spannungen und Drucken mit dem Gleichgewicht eines flüssigen dielektrischen Mediums verträglich ist, und daß dieser Spannungszustand in dem Medium mechanisch gleichwertig ist mit der Anziehung und Abstossung, welche elektrische Körper zeigen.

Ich habe indes nicht versucht, durch eine Hypothese über die innere Konstitution des dielektrischen Mediums zu erklären, auf welche Weise die elektrische Verschiebung diesen Spannungszustand verursacht, oder von ihm begleitet ist.

Wir haben so vermittelt der Induktionsfäden und der Flächen gleichen Potentials ein geometrisches Modell des Feldes der elektrischen Kraft konstruiert. Zeichnungen von speziellen Fällen sind in den Figuren am Ende dieses Buches gegeben.

Die Richtung und Gröfse der elektrischen Kraft an einem Punkte kann entweder durch die Flächen gleichen Potentials oder durch die Induktionsfäden angegeben werden. Wenn sie daher auf beide Weisen dargestellt werden, so können wir durch das Studium der Beziehung zwischen den Flächen gleichen Potentials und den Induktionsfäden wichtige Theoreme in der Theorie der Elektrizität ableiten.

Über den Gebrauch von Analogieen in der Physik.

64. In manchen Fällen haben die Beziehungen, in der die Erscheinungen zu einander stehen, in zwei verschiedenen physikalischen Gebieten eine gewisse Ähnlichkeit, welche uns in den Stand setzt, wenn wir die Fragen in dem einen von diesen Gebieten gelöst haben, diese Lösung zur Beantwortung der Fragen in dem anderen anzuwenden. Die Ähnlichkeit, welche die Analogie hervorbringt, ist nicht eine Ähnlichkeit der Erscheinungen selbst, sondern eine Ähnlichkeit der Beziehungen dieser Erscheinungen unter einander.

Um mit einem Fall von außerordentlicher Einfachheit zu beginnen: ein im Rechnen langsamer Mensch, der den Preis von 52 m Seide, pro Meter 7 Mark finden sollte, könnte, wenn er sich zufällig erinnerte, dafs in einem Jahre von 365 Tagen 52 Wochen und ein Tag enthalten sind, gleich die Antwort geben, 364 Mark, ohne die Rechnung auszuführen. Hier ist gar keine Ähnlichkeit zwischen den Gröfsen selbst — den Wochen und den Metern Seide —; die einzige Ähnlichkeit besteht zwischen den arithmetischen Beziehungen dieser Gröfsen zu anderen in derselben Frage.

Die Analogie zwischen elektrostatischen Phänomenen und denen der gleichförmigen Leitung der Wärme in festen Körpern wurde zuerst von Sir W. Thomson in einer Arbeit ausgeführt: „Über die gleichförmige Bewegung der Wärme in homogenen, festen Körpern und über ihren Zusammenhang mit der mathematischen Theorie der Elektrizität“, veröffentlicht in *Cambridge Mathematical Journal*, Febr. 1842; wieder abgedruckt in *Phil. Mag.* 1854, und in der Sammlung von Thomsons Arbeiten über Elektrostatik und Magnetismus. Die Analogie ist von folgender Art:

Elektrostatik.	W ä r m e.
Das elektrische Feld.	Ein ungleich erwärmter Körper.
Ein dielektrisches Medium.	Ein Körper, welcher Wärme leitet.
Das elektrische Potential an verschiedenen Punkten des Feldes.	Die Temperatur an verschiedenen Punkten im Körper.
Die elektromotorische Kraft, welche positiv elektrische Körper von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials, zu bewegen strebt.	Der Wärmestrom in Folge der Leitung von Stellen höherer zu Stellen niederer Temperatur.
Ein leitender Körper.	Ein vollkommener Wärmeleiter.
Die positiv elektrische Oberfläche eines Leiters.	Eine Oberfläche, durch welche Wärme in den Körper strömt.
Die negativ elektrische Oberfläche eines Leiters.	Eine Oberfläche, durch welche Wärme aus dem Körper herausfließt.
Ein positiv elektrischer Körper.	Eine Wärmequelle.
Ein negativ elektrischer Körper.	Ein Wärmeabzug, d. h. eine Stelle, wo Wärme aus dem Körper verschwindet.
Eine Fläche gleichen Potentials.	Eine isotherme Fläche.
Eine Induktionslinie oder ein Induktionsfaden.	Eine Stromlinie oder ein Stromfaden der Wärme.

Durch verständige Anwendung dieser Analogie und anderer derselben Art ist der Fortschritt der Physik sehr gefördert worden. Um die Gefahr von bloßen Hypothesen zu vermeiden, müssen wir die wahre Natur von Analogieen dieser Art studieren. Wir dürfen nicht aus der teilweisen Ähnlichkeit von einigen Beziehungen zwischen den Erscheinungen der Wärme und Elektrizität schließen, daß wirklich eine physikalische Ähnlichkeit zwischen den Ursachen dieser Erscheinungen vorhanden ist. Die Ähnlichkeit ist nur eine Ähnlichkeit der Beziehungen, nicht eine Ähnlichkeit der in Beziehung stehenden Dinge.

Diese Ähnlichkeit, so weit sie besteht, ist so vollständig, daß wir irgend ein Resultat, welches wir entweder in der Elektrizität oder in der Wärmeleitung gefunden haben, sofort aus der Sprache der einen Disziplin in die der anderen übertragen können, ohne Furcht zu irren; und in der Weiterverfolgung unserer Untersuchungen über den einen Gegenstand haben wir die Freiheit, die zu dem anderen gehörenden Vorstellungen zu benutzen, wenn wir dadurch in den Stand gesetzt werden, klarer die Beziehungen zwischen einem Schritte und einem anderen in unserer Überlegung einzusehen.

Wir müssen im Sinne behalten, daß zu der Zeit, als Sir W. Thomson die Analogie zwischen elektrostatischen und thermischen Phäno-

menen ausfuhrte, die Männer der Wissenschaft fest davon überzeugt waren, einerseits dafs die elektrische Anziehung eine direkte Wirkung zwischen entfernten Körpern ist, andererseits dafs die Wärmeleitung der kontinuierliche Strom eines materiellen Fluidums durch einen festen Körper ist. Die Unähnlichkeit daher zwischen den Dingen selbst erschien damals viel gröfser als sie den Lesern dieses Werkes erscheint, die, wofern sie nicht schon vorher sich unterrichtet haben, nicht gehört haben, dafs Wärme ein Fluidum ist oder Elektrizität in die Ferne wirkt.

65. Aber wir müssen jetzt die Grenzen der Analogie betrachten, die Punkte, über welche hinaus wir die Analogie nicht treiben dürfen.

Zuerst ist es nur eine spezielle Klasse von Fällen der Wärmeleitung, welche analoge Fälle in der Elektrostatik hat. Im allgemeinen bewirkt die Wärme, wenn sie durch einen Körper fliefst, dafs in gewissen Teilen des Körpers die Temperatur steigt und in anderen fällt, und der Wärmestrom, welcher von dem Verhältnis dieser Temperaturen abhängt, ist daher variabel. Wenn die Wärmezufuhr gleichmäfsig gehalten wird, so streben die Temperaturen der verschiedenen Teile des Körpers, sich einem Zustande zu nähern, in welchem sie konstant bleiben. Die Wärmemenge, welche in einen gegebenen Teil des Körpers hineingeht, ist dann genau gleich derjenigen, welche während derselben Zeit aus ihm herausgeht. Unter diesen Umständen nennt man den Wärmestrom stationär.

Die Analogie mit elektrischen Erscheinungen nun erstreckt sich nur auf den stationären Wärmestrom. Der allgemeine Fall, der eines variablen Wärmestromes, hat nichts Analoges in der Elektrostatik, und sogar dieser ganz spezielle Fall eines stationären Wärmestromes unterscheidet sich in einem sehr wesentlichen Punkte von dem analogen elektrostatischen Phänomen. Der stationäre Wärmestrom mufs durch kontinuierliche und in konstanter Weise stattfindende Zufuhr von Wärme und durch in gleichem Verhältnis stattfindende Entziehung von Wärme aufrecht erhalten werden. Dies involviert einen kontinuierlichen Aufwand von Energie, um den Wärmestrom in konstantem Zustand zu halten, so dafs, obwohl der Zustand des Körpers konstant und unabhängig von der Zeit bleibt, doch das Zeitelement in die Berechnung des Betrages der aufgewendeten Arbeit eingeht.

Das Zeitelement geht nicht in die Berechnung ein bei dem entsprechenden Falle in der Elektrostatik. So viel wir wissen, könnte eine Reihe von elektrischen Körpern, die sich in einem vollkommen isolierenden Medium befinden, für immer elektrisch bleiben, ohne dafs irgend etwas aus äufseren Quellen zugeführt werden brauchte. Nichts ist in diesem Falle vorhanden, worauf wir die Bezeichnung „Strom“ anwenden könnten, welche wir auf den Fall der Übertragung der Wärme in demselben eigentlichen Sinne anwenden, wie auf den Fall eines Stromes von Elektrizität, von Wasser, oder von der Zeit selbst.

66. Eine andere Grenze für die Analogie ist die, daß die Temperatur eines Körpers nicht geändert werden kann, ohne Änderung ~~ihres~~ physikalischen Zustandes. Die Dichtigkeit, Leitungsfähigkeit, die elektrischen Eigenschaften u. s. w. ändern sich alle, wenn die Temperatur steigt.

Das elektrische Potential dagegen, welches das Analogon der Temperatur ist, ist nur ein wissenschaftlicher Begriff. Wir haben keinen Grund dafür, das Potential als Bezeichnung für einen physikalischen Zustand anzusehen. Wenn eine Anzahl von Körpern in einem hohlen Metallgefäße sind, welches sie vollkommen einschließt, so können wir die äußere Fläche des Gefäßes laden und entladen, wie wir wollen, ohne irgend eine physikalische Wirkung auf die innen befindlichen Körper auszuüben. Aber wir wissen, daß das elektrische Potential der eingeschlossenen Körper mit dem des Gefäßes steigt und fällt. Dies kann man beweisen, wenn man einen mit der Erde verbundenen Leiter durch ein Loch in das Gefäß einführt. Das Verhalten der eingeschlossenen Körper zu diesem Leiter wird sich durch Ladung und Entladung des Gefäßes ändern. Aber wenn der Leiter entfernt ist, so ist das gleichzeitige Steigen und Fallen der Potentiale der Körper an dem Gefäß nicht von irgend einer physikalischen Wirkung begleitet.

67. Faraday¹⁾ bewies dies, indem er einen hohlen Würfel von 12 Fuß Kantenlänge baute, diesen mit gut leitenden Stoffen bedeckte, vom Boden isolierte und durch eine kräftige Maschine stark isolierte. „Ich ging in diesen Würfel hinein“, sagt er, „und lebte in ihm, aber obwohl ich brennende Lichter, Elektrometer und alle anderen Prüfungsmittel auf elektrischen Zustand anwendete, konnte ich nicht die geringste Einwirkung auf sie finden, oder die Anzeige von irgend etwas Besonderem, das in ihnen vorging, obwohl die ganze Zeit hindurch die Außenseite des Würfels stark geladen war und große Funken und Büschel von jedem Teile seiner äußeren Oberfläche ausgingen.“ Daraus sieht man also, daß die allerplötzlichsten Änderungen des Potentials keine physikalische Wirkung auf die Materie hervorbringen, weder Leben noch Tod, wofern nur diese Änderungen gleichzeitig bei allen Körpern in dem Felde vor sich gehen.

Wenn Faraday, statt seinen Würfel auf hohes elektrisches Potential zu bringen, ihn auf hohe Temperatur gebracht hätte, so würde das Resultat, wie wir wissen, ein ganz anderes gewesen sein.

68. Es ist also klar, daß die Analogie zwischen der Wärmeleitung und elektrostatischen Erscheinungen ihre Grenzen hat, über welche hinaus wir sie nicht zu treiben versuchen dürfen. Zu der Zeit, als Thomson sie ausführte, waren die Gelehrten bereits mit dem großen Werk von Fourier über Wärmeleitung in festen Körpern

¹⁾ Exp. Res. 1173.

bekannt, und sie waren viel vertrauter mit den dort entwickelten Anschauungen, als mit denen, welche sich auf strömende Elektrizität oder auf die Theorie der elektrischen Verrückungen in einem Medium beziehen.

Es ist richtig, daß Ohm im Jahre 1827 die von Fourier für die Wärme erlangten Resultate auf die Theorie der Verteilung der elektrischen Ströme in Leitern anwendete; aber es dauerte lange, bevor der praktische Wert von Ohm's Arbeit verstanden wurde; und bis man mit der Idee von elektrischen Strömen in festen Leitern vertraut wurde, würde eine Erläuterung von elektrostatischen Erscheinungen durch solche Ströme eher dazu gedient haben, die Vorstellungen zu verdunkeln, als sie zu erhellen.

69. Wenn ein elektrischer Strom durch einen starren Körper fließt, so geht die Richtung des Stromes an irgend einem Punkte von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials, und seine Intensität ist proportional dem Verhältnisse, in welchem das Potential von Punkt zu Punkt auf einer in der Richtung des Stromes gezogenen Linie abnimmt.

Wir können in dem leitenden Medium Flächen gleichen Potentials gezogen denken. Die Stromlinien sind überall rechtwinkelig zu den Flächen gleichen Potentials und die Stärke des Stromes ist proportional der Anzahl der Flächen gleichen Potentials, welche von einer Linie gleich der Längeneinheit, gezogen in der Richtung des Stromes, geschnitten werden würden. Man sieht daher, daß dieser Fall eines leitenden Mediums, durch welches ein elektrischer Strom geht, gewisse Analogieen hat mit dem Falle eines dielektrischen Mediums, das durch elektrische Körper begrenzt ist.

In beiden wird das Medium durch eine Reihe von Flächen gleichen Potentials in Schalen geteilt. In beiden gibt es ein System von Linien, welche überall senkrecht zu diesen Flächen sind. In dem einen Falle werden diese Linien Stromlinien oder Strömungslinien genannt; in dem anderen Falle werden sie Linien der elektrischen Kraft oder elektrischen Induktion genannt.

Ein System von solchen Linien, die von allen Punkten einer gegebenen Linie aus gezogen sind, wird eine Stromfläche genannt. Da die Linien, aus welchen diese Fläche gebildet ist, überall in der Richtung des elektrischen Stromes laufen, so geht kein Teil des Stromes durch die Stromfläche hindurch. Man kann also eine solche Fläche als undurchdringlich für den Strom betrachten, ohne daß sonst irgend etwas in dem System geändert wird.

Wenn die Linie, von welcher aus das System der Stromlinien gezogen ist, eine in sich selbst zurückkehrende ist, was wir eine geschlossene Curve oder kürzer einen Ring nennen, so wird die Stromfläche die Form einer Röhre haben, und wir nennen sie dann einen

Stromfaden. Irgend zwei Querschnitte desselben Stromfadens entsprechen einander in dem in Art. 54 definierten Sinne und die Elektrizitätsmengen, welche in derselben Zeit durch diese beiden Querschnitte hindurchfließen, sind gleich.

Hier haben wir also das Analoge zu Faradays Gesetz, daß die Elektrizitätsmengen auf entsprechenden Flächenstücken von zwei einander gegenüberliegenden leitenden Oberflächen gleich und entgegengesetzt sind.

Faraday machte starken Gebrauch von dieser Analogie zwischen elektrostatischen Erscheinungen und den Erscheinungen des elektrischen Stromes, oder, wie er es ausdrückte, zwischen Induktion in dielektrischen und Leitung in leitenden Medien, und er bewies, daß in vielen Fällen Induktion und Leitung zusammengehörige Erscheinungen sind. Exp. Res. 1320, 1326.

Wir müssen uns indes daran erinnern, daß der elektrische Strom nicht konstant durch einen Leiter hindurchgehen kann, welcher seinem Durchgang Widerstand leistet; ohne einen kontinuierlichen Aufwand von Energie, während die Induktion in einem vollkommen isolierenden, dielektrischen Medium zwischen zwei entgegengesetzt elektrischen Leitern eine beliebig lange Zeit ohne irgend welchen Aufwand von Energie aufrecht erhalten kann, abgesehen von dem Aufwande, welcher zur Erzeugung der ursprünglichen Elektrisierung erfordert wurde. Das Zeitelement tritt bei der Leitung in einer Weise auf, wie es bei der Induktion nicht auftritt.

70. Aber wir können zu einer vollkommeneren Vorstellung von der Induktion gelangen, wenn wir sie nicht mit dem augenblicklichen Zustande eines Stromes, sondern mit den kleinen Verrückungen in einem Medium von unveränderlicher Dichte vergleichen.

Kehren wir zu dem Falle eines elektrischen Stromes durch einen starren Leiter zurück und nehmen wir an, daß der Strom, nachdem er eine sehr kurze Zeit geflossen ist, aufhört. Betrachten wir eine in dem starren Körper gezogene Fläche, dann wird, wenn diese Fläche die Stromfäden schneidet, eine gewisse Menge von Elektrizität von einer Seite der Fläche zu der anderen in der Zeit, in der der Strom floß, übergegangen sein.

Dieser Durchgang der Elektrizität durch die Fläche wird elektrische Verschiebung genannt, und die Verschiebung durch eine gegebene Fläche ist die Elektrizitätsmenge, welche durch sie hindurchgeht. Im Falle eines kontinuierlichen Stromes wächst die Verschiebung so lange, als der Strom erhalten wird, aber wenn der Strom eine endliche Zeit hindurch dauert, erreicht die Verschiebung ihren Endwert und bleibt dann konstant. Die Stromlinien, Flächen und Fäden des hindurchgehenden Stromes sind auch Linien, Flächen und Fäden der Verschiebung. Die Verschiebungen durch irgend zwei Querschnitte

deselben Fadens sind gleich. Am Anfang jedes Einheitsfadens ist eine Einheit positiver Elektrizität und am Ende des Fadens ist eine Einheit negativer Elektrizität vorhanden.

In jedem Punkte des Mediums findet ein Spannungszustand statt, bestehend aus einem Zug in der Richtung der Verrückung und einem Druck in allen Richtungen, die senkrecht zur Verrückungsrichtung sind. Der Zahlenwert des Zuges ist gleich dem des Druckes, nämlich das Quadrat der Intensität der elektrischen Kraft, dividiert durch 4π .

71. Durch die Betrachtung der Eigenschaften der Induktionsfäden und der Flächen gleichen Potentials können wir leicht einige wichtige allgemeine Theoreme in der Theorie der Elektrizität beweisen, deren Beweis durch die älteren Methoden lang und schwierig ist. Die Eigenschaften eines Induktionsfadens haben wir bereits festgesetzt, aber für das Folgende wollen wir sie noch einmal anführen.

(1) Wenn ein Induktionsfaden durch eine gedachte Fläche geschnitten wird, so ist die durch einen Querschnitt des Fadens hindurchgeschobene Elektrizitätsmenge immer dieselbe, wo auch der Querschnitt in den Faden genommen sein mag.

(2) Eine elektrostatische Kraftlinie schneidet in jedem Teile ihres Laufes die Flächen gleichen Potentials rechtwinkelig und sie geht immer von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials.

Note. Dieser Satz ist nur dann richtig, wenn die Verteilung der elektrischen Kraft vollständig durch eine Reihe von Flächen gleichen Potentials dargestellt werden kann. Das ist immer der Fall, wenn die Elektrizität im Gleichgewicht ist; aber wenn elektrische Ströme vorhanden sind, so kann es wohl in einigen Teilen des Feldes möglich sein, eine Reihe von Flächen gleichen Potentials zu ziehen; es gibt aber andere Teile des Feldes, wo die Verteilung der elektrischen Kraft nicht durch solche Flächen dargestellt werden kann. Denn ein elektrischer Strom hat immer die Natur eines in sich selbst zurückkehrenden Kreises und ein solcher Kreis kann nicht in jedem Teile seiner Bahn von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials fortschreiten.

72. Man beachte, daß wir in (1) das Wort „Induktionsfaden“ und in (2) die Worte „elektrostatische Kraftlinie“ gebraucht haben. In einem flüssigen Dielektricum, wie Luft, hat die elektrostatische Kraftlinie immer dieselbe Richtung wie der Induktionsfaden und es kann pedantisch aussehen, wenn man eine Unterscheidung zwischen ihnen aufrecht erhält. Es gibt jedoch andere Fälle, bei welchen es sehr wichtig ist, sich zu erinnern, daß ein Induktionsfaden in Beziehung auf die Erscheinungen definiert wurde, welche wir elektrische Verschiebung genannt haben, während eine Kraftlinie mit Bezug auf die elektrische Kraft definiert wurde. In Flüssigkeiten geht die elektrische Verschiebung immer in Richtung der elektrischen Kraft vor

sich, aber es gibt feste Körper, in denen das nicht der Fall ist¹⁾ und in welchen daher die Induktionsfäden nicht der Richtung nach mit den Kraftlinien zusammenfallen.

73. Es folgt aus (1), daß jeder Induktionsfaden an einer Stelle beginnt, wo eine gewisse Quantität von positiver Elektrizität vorhanden ist, und an einer Stelle endet, wo eine gleiche Menge negativer Elektrizität vorhanden ist und daß, umgekehrt, auch von jeder Stelle aus, wo positive Elektrizität vorhanden ist, ein Faden gezogen werden kann, und daß, wo immer negative Elektrizität vorhanden ist, ein Faden enden muß.

74. Es folgt aus (2), daß das Potential am Anfang eines Fadens höher ist, als an seinem Ende. Daher kann ein Faden nicht in sich selbst zurückkehren; denn in diesem Falle würde derselbe Punkt zwei verschiedene Potentiale haben, was nicht möglich ist.

75. Daraus können wir beweisen, daß, wenn das Potential an jedem Punkte einer geschlossenen Fläche daselbe ist, und wenn innerhalb dieser Fläche kein elektrischer Körper ist, daß dann das Potential an jedem Punkte des eingeschlossenen Raumes innerhalb der geschlossenen Fläche, daselbe ist wie das an der Oberfläche.

Denn wenn irgend eine Differenz der Potentiale zwischen einem Punkte und einem anderen innerhalb dieses Raumes herrschte, so würden auch Kraftlinien von Stellen höheren zu Stellen niederen Potentials vorhanden sein. Diese Linien können, wie wir gesehen haben, nicht in sich selbst zurückkehren. Sie müssen daher ihre Enden entweder innerhalb des Raumes haben, oder außerhalb. Nun kann aber keine Kraftlinie ihr Ende innerhalb dieses Raumes haben; denn dann müßte am Anfang dieser Kraftlinie positive und am Ende negative Elektrizität vorhanden sein, und wir haben doch vorausgesetzt, daß keine Elektrizität innerhalb dieses Raumes vorhanden ist. Andererseits kann auch eine Kraftlinie innerhalb dieses Raumes nicht ihre Enden außerhalb des Raumes haben. Denn in diesem Falle müßte sie an einem Punkte der Oberfläche in den Raum eintreten und an einem anderen aus ihm heraustreten, und daher müßte nach (2) das Potential an dem Eintrittspunkte höher sein als am Austrittspunkte, was unserer Voraussetzung widerspricht, daß das Potential an jedem Punkte der Fläche daselbe ist.

Es kann also keine Kraftlinie innerhalb dieses Raumes existieren, und daher ist das Potential an irgend einem Punkte in diesem Raume daselbe, wie an der Oberfläche selbst.

76. Aus diesem Satze folgt, daß, wenn die geschlossene Fläche die innere Fläche eines hohlen leitenden Gefäßes ist, und wenn innerhalb

¹⁾ Siehe die Experimente von Boltzmann über Schwefelkrystalle. Wien. Sitzungsber. 9. Jan. 1873.

dieser Fläche kein elektrischer Körper vorhanden ist, daß dann auf der inneren Oberfläche keine Elektrizität vorhanden ist. Denn wenn sie vorhanden wäre, so würden Kraftlinien von den elektrischen Teilen der Fläche in den inneren Raum hineingehen, und wir haben bereits bewiesen, daß es in diesem Raume keine Kraftlinien gibt.

Wir haben das früher durch das Experiment bewiesen (Art. 20); aber wir sehen jetzt, daß es eine notwendige Folge aus den Eigenschaften der Kraftlinie ist.

Übereinanderlagerung elektrischer Systeme.

77. Wir haben bereits (Art. 29) einige Beispiele von der Superposition elektrischer Wirkungen gegeben, aber wir müssen jetzt das Prinzip der Superposition bestimmter aufstellen.

Wenn ein und daselbe System auf drei verschiedene Weisen elektrisiert wird, so daß das Potential an einem Punkte im dritten Falle die Summen der Potentiale im ersten und zweiten Falle ist, dann wird auch die Elektrisierung irgend eines Teiles des Systems im dritten Falle die Summe der Elektrisierungen deselben Teiles im ersten und zweiten Falle sein.

Kehren wir das Zeichen der Elektrisierungen und Potentiale in einem dieser beiden Fälle um, so können wir das Prinzip in bezug auf den Fall aussprechen, wenn das Potential und die Elektrisierung in jedem Punkte die Differenz der betreffenden Größen im ersten und im zweiten Falle ist.

78. Wir können jetzt einen Satz aufstellen, welcher von der größten Wichtigkeit in der Theorie der Elektrizität ist.

Wenn das betrachtete elektrische Feld aus einem begrenzten Teile eines dielektrischen Mediums besteht und wenn an jedem Punkte der Grenze dieses Gebietes das Potential gegeben ist und wenn auch die Verteilung der Elektrisierung in diesem Gebiete gegeben ist, dann kann das Potential an einem Punkte in diesem Gebiete einen und nur einen Wert haben, der mit diesen Bedingungen sich verträgt.

Ein Wert des Potentials wenigstens muß möglich sein, weil die Bedingungen des Theorems physikalisch möglich sind. Wenn dagegen an einem Punkte zwei Werte des Potentials möglich wären, dann nehme man den Überschufs des ersten Wertes über den zweiten für jeden Punkt des Systems und bilde so ein drittes System, in welchem das Potential überall der Überschufs des ersten Falles über den zwei-

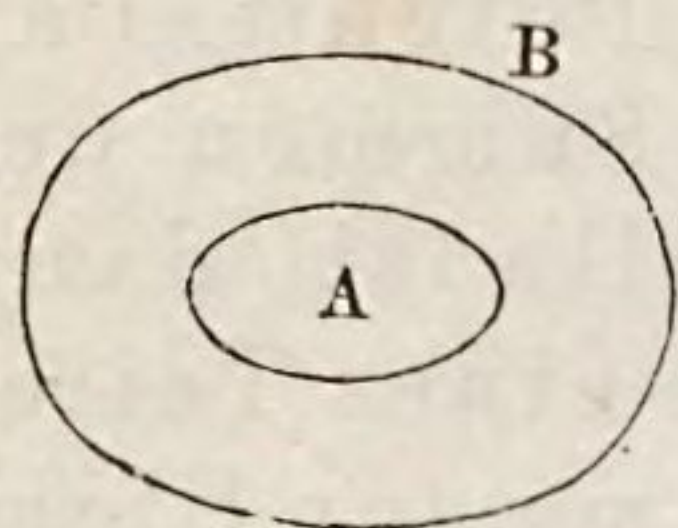
ten ist. An der Grenze des Gebietes ist das Potential in dem dritten Falle überall Null. Innerhalb des Raumes ist die Elektrisierung überall Null. Folglich ist nach Art. 75 in jedem Punkte innerhalb des Raumes das Potential im dritten Falle Null.

Es gibt also keine Differenz zwischen der Verteilung des Potentials im ersten Falle und der im zweiten, oder mit anderen Worten, das Potential an einem Punkte innerhalb des Raumes kann nur einen Wert haben.

Wenn wir in irgend einem Falle eine Verteilung der Potentials finden können, welche den gegebenen Bedingungen genügt, dann sind wir infolge dieses Theorems sicher, daß diese Verteilung die einzig mögliche Lösung des Problems ist. Darauf beruht die Wichtigkeit dieses Satzes in der Theorie der Elektrizität.

79. Es sei z. B. A ein elektrischer Körper und B eine von den Flächen gleichen Potentials, welche den Körper umgeben. Das Potential an der Fläche B sei gleich P . Nun werde ein leitender Körper

Fig. 18.



konstruiert und so gelegt, daß seine äußere Fläche mit der geschlossenen Fläche B zusammenfällt, und er werde so elektrisiert, daß sein Potential P ist. Dann sind die Bedingungen für den Raum außerhalb B dieselben, als wenn bloß der Körper A auf diesen Raum wirkte. Denn das Potential ist auf der ganzen Grenzfläche des Raumes gleich P , dasselbe wie früher, und wenn elektrische Körper außerhalb B vorhanden sind, so bleiben sie ungeändert. Das Potential an jedem Punkte außerhalb B kann in Übereinstimmung mit den Bedingungen dasselbe sein, wie früher. Nach unserem jetzigen Theorem muß daher das Potential an jedem Punkte außerhalb B dasselbe sein, wenn wir anstatt des Körpers A eine leitende Fläche B haben, die auf das Potential P gebracht ist.

80. Die Ladung jedes Teiles der Oberfläche eines Leiters hat dasselbe Zeichen wie sein Potential, es müßte denn sein, daß ein anderer Körper in dem Felde vorhanden ist, dessen Potential von demselben Zeichen, aber dem Zahlenwerte nach größer ist.

Nehmen wir an, das Potential des Körpers sei positiv; wenn dann an irgend einem Teile seiner Oberfläche negative Elektrizität vorhanden ist, so müssen an diesem Teile der Oberfläche Kraftlinien enden und diese Kraftlinien müssen an irgend einer elektrischen Fläche beginnen, deren Potential höher ist als das des Körpers. Wenn daher kein anderer Körper vorhanden ist, dessen Potential höher als das des gegebenen Körpers ist, so kann kein Teil der Oberfläche des gegebenen Körpers mit negativer Elektrizität geladen sein.

Wenn ein unisolierter Leiter in dasselbe Feld mit einem geladenen Leiter gestellt wird, so ist die Ladung auf jedem Teile der Oberfläche

des unisolierten Leiters von entgegengesetztem Zeichen als die Ladung des geladenen Leiters.

Denn da das Potential des unisolierten Körpers Null ist, so kann keine Kraftlinie zwischen ihm und den Wänden des Raumes, oder dem unendlichen Raume, wo das Potential immer Null ist, existieren.

Die Kraftlinie, welche ein Ende an einem Punkte der Oberfläche dieses Körpers hat, muß daher ihr anderes Ende an einem Punkte des geladenen Körpers haben, und da die beiden Enden einer Kraftlinie entgegengesetzt elektrisch sind, so muß die Elektrisierung der Oberfläche des unisolierten Körpers überall entgegengesetzt sein der Ladung des geladenen Körpers.

Der geladene Körper in diesem Experiment wird der induzierende und der andere Körper der induzierte genannt.

Wenn der induzierte Körper unisoliert ist, so ist die über jeden Teil seiner Oberfläche verteilte Elektrizität, wie wir eben bewiesen haben, von entgegengesetztem Zeichen als die des induzierenden Körpers.

Die Gesamtladung E_A des induzierten Körpers, welchen wir A nennen wollen, kann man finden, indem man P_B , das Potential des induzierenden Körpers B , mit Q_{AB} multipliziert, dem Coefficienten der gegenseitigen Induktion zwischen den Körpern, welche immer eine negative GröÙe ist.

Diese auf einem unisolierten Körper induzierte Elektrizität wird von einigen Autoren die induzierte Elektrizität erster Art genannt. Da das Potential von A immer Null ist, so ist klar, daß, wenn seine Oberfläche mit einem feinen Draht berührt wird, der mit dem Boden in Verbindung steht, keine Entladung stattfinden wird.

Nun nehmen wir an, daß der Körper A , statt unisoliert zu sein, isoliert, aber anfangs ohne Ladung ist. Unter der Wirkung des induzierenden Körpers B werden einige Teile seiner Oberfläche, auf der B zugewendeten Seite, von entgegengesetzter Art elektrisch werden als B ; aber da die algebraische Summe seiner Elektrizität Null ist, müssen andere Teile seiner Oberfläche von derselben Art elektrisch werden wie B .

Diese Elektrizität, die gleichnamig mit B ist, wird von Autoren die induzierte Elektrizität zweiter Art genannt. Wenn jetzt ein mit dem Boden verbundener Draht mit einem Teil der Oberfläche von A in Berührung gebracht wird, so wird die mit B gleichnamige Elektrizität abgeleitet werden, die an Betrag gleich und entgegengesetzt ist der negativen Ladung (der ersten Art), welche auf dem Körper A bleibt, der jetzt auf das Potential Null reduziert ist.

Um eine klarere Vorstellung von der Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche von A unter verschiedenen Bedingungen zu erhalten, fangen wir damit an, daß wir annehmen, das Potential von A sei Null

und das von B sei 1. Die Oberflächendichtigkeit an einem gegebenen Punkte P sei σ_1 und die gesamte Ladung von A sei $-q_{AB}$. Das negative Zeichen ist den Ausdrücken für diese Größen vorgesetzt, weil die Größen selbst immer negativ sind.

Die Ladung von B in diesem Falle ist q_B .

Weiter nehmen wir an, das Potential von A sei Eins und das von B sei Null, und die Oberflächendichtigkeit im Punkte P sei jetzt σ_2 und die gesamte Ladung auf A sei q_A .

Die Größen sind beide wesentlich positiv und q_A wird genannt die Kapazität von A . Der Wert beider vergrößert sich wegen der Anwesenheit von B in dem Felde.

Nun nehmen wir an, daß die Potentiale von A und B respektive sind P_A und P_B , dann ist die Dichtigkeit im Punkte P

$$\sigma = P_A \sigma_2 - P_B \sigma_1,$$

und die Ladung von A ist

$$E_A = P_A q_A - P_B q_{AB},$$

und die von B ist

$$E_B = P_B q_B - P_A q_{AB}. \quad (\text{s. Art. 39}).$$

Wenn A isoliert und ohne Ladung ist, ist $E_A = 0$, woraus folgt

$$P_A = P_B \frac{q_{AB}}{q_A},$$

und die Oberflächendichtigkeit am Punkte P ist

$$\sigma = \frac{P_B}{q_A} (q_{AB} \sigma_2 - q_A \sigma_1).$$

Auf einem Teile der Oberfläche von A in der Nähe von B , wird σ von entgegengesetztem Zeichen sein als P_B . Und auf einem Teile auf der anderen Seite von B wird σ daselbe Zeichen haben wie P_B . Die Grenze zwischen diesen beiden Gebieten bildet die sogenannte neutrale Linie, deren Gestalt und Lage abhängt von der Gestalt und Lage von A und B .

Sechstes Kapitel.

Spezielle Fälle der Verteilung der Elektrizität.

81. Ein kugelförmiger Leiter befindet sich elektrisiert und isoliert innerhalb der konzentrischen inneren Kugelfläche eines leitenden Gefäßes.

Infolge der vollkommenen Symmetrie dieses Systems nach allen Richtungen wird, wie sofort einleuchtet, die Verteilung der Elektrizität auf jeder der beiden einander gegenüberstehenden Kugelflächen eine gleichmäßige sein. Die Kraftlinien werden in Richtungen verlaufen, die durch den Mittelpunkt der Kugeln gehen, und die Flächen gleichen Potentials werden Kugeln sein, welche diesen Punkt zum Zentrum haben.

Wenn e die Menge der Elektrizität auf der inneren Kugel und E die auf der Oberfläche der äußeren Kugel ist, dann ist nach Experiment VIII

$$E = - e \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Sind r und R die Radien der Kugeln, s und S ihre Oberflächen, σ und Σ die Werte der Oberflächendichtigkeit der Elektrizität auf diesen Oberflächen, dann lehrt die Geometrie, daß

$$s = 4 \pi r^2 \quad S = 4 \pi R^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

ist, wo π das Verhältnis des Kreisumfangs zum Durchmesser ist.

Die gesamte Ladung auf jeder Kugel findet man, wenn man die Oberfläche mit der Oberflächendichtigkeit multipliziert, also

$$e = s \sigma \quad E = S \Sigma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

daher

$$\sigma = \frac{e}{4 \pi r^2} \quad \Sigma = \frac{E}{4 \pi R^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

und nach (1)

$$\Sigma = - \frac{e}{4 \pi R^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Man sieht daher, daß, wenn die Ladung e auf der inneren Kugel gegeben ist, die Oberflächendichtigkeit Σ auf der inneren Fläche des Gefäßes umgekehrt proportional ist dem Quadrat der Entfernung dieser Fläche von dem Mittelpunkte der elektrisierten Kugel.

Daraus folgt nach Coulombs Gesetz (Experiment XIII, Art. 47), daß die elektromotorische Kraft an der äußeren Kugelfläche umgekehrt proportional ist dem Quadrat der Entfernung von dem Mittelpunkt der Kugel.

Das ist das Gesetz, nach welchem die elektrische Kraft in verschiedenen Entfernungen von einer gleichmäßig elektrisierten Kugel sich verändert. Die Größe der Kraft ist unabhängig von dem Radius der inneren, elektrisierten Kugel und hängt nur von der gesamten Ladung auf ihr ab. Wenn wir annehmen, daß der Radius der inneren Kugel sehr klein wird, bis zuletzt die Kugel nicht mehr von einem Punkte unterschieden werden kann, so können wir uns die gesamte Ladung in diesem Punkte konzentriert denken, und wir können dann unser Resultat so ausdrücken, daß wir sagen, die elektrische Wirkung einer gleichmäßig elektrisierten Kugel auf einen Punkt außerhalb der Kugel ist dieselbe, wie wenn die gesamte Ladung der Kugel in dem Mittelpunkte der Kugel konzentriert wäre.

Wir müssen jedoch im Sinne behalten, daß es physikalisch unmöglich ist, die kleine Kugel mit mehr als einer gewissen Menge Elektrizität auf jeder Flächeneinheit ihrer Oberfläche zu laden. Wenn die Oberflächendichtigkeit diese Grenze überschreitet, so wird die Elektrizität in Form einer Büschelentladung entweichen. Die Vorstellung eines elektrischen Punktes ist also eine bloße mathematische Fiktion, welche niemals in der Natur verwirklicht werden kann. Die gedachte, in dem Mittelpunkte der Kugel konzentrierte Ladung, welche außerhalb der Kugel eine Wirkung hervorbringt, die derjenigen der wirklichen Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche äquivalent ist, wird das elektrische Bild dieser Verteilung genannt. Siehe Art. 100.

Messung der Elektrizität.

82. Wir haben bereits Methoden beschrieben, um die Größe der Elektrisierung auf verschiedenen Körpern vergleichen zu können, aber in jedem Falle haben wir nur eine Elektrizitätsmenge mit einer anderen verglichen, ohne den absoluten Wert einer von beiden zu bestimmen. Um den absoluten Wert einer elektrischen Ladung zu bestimmen, müssen wir sie mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge vergleichen, welche wir als Einheit annehmen.

Die in der Elektrostatik angenommene Einheit der Elektrizität ist diejenige Menge positiver oder Glaselektrizität, welche, wenn sie in

einem Punkte konzentriert und in die Einheit der Entfernung von einer gleichen Ladung gebracht ist, die auch in einem Punkte konzentriert ist, diese zweite Ladung mit der Einheit der mechanischen Kraft abstossen würde. Als dielektrisches Medium zwischen den beiden geladenen Punkten wird dabei die Luft angenommen.

83. Nehmen wir nun an, daß zwei Körper mit Elektrizität geladen sind, deren Dimensionen im Verhältniss zu ihrem Abstand klein sind. Die Ladung des ersten Körpers bestehe aus e Einheiten der Elektrizität, die des zweiten aus e' Einheiten, und der Abstand zwischen den Körpern sei r . Da die Kraft umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung variiert, so wird die Kraft, mit welcher jede Einheit der Elektrizität in dem ersten Körper jede Elektrizitätseinheit in dem zweiten Körper abstößt, gleich $\frac{1}{r^2}$ sein, und da die Zahl der Paare von Einheiten, von jedem Körper je eine genommen, gleich ee' ist, so wird die gesamte Abstossung zwischen den Körpern sein

$$f = \frac{ee'}{r^2}.$$

Wenn die Ladung des ersten oder des zweiten Körpers negativ ist, müssen wir e oder e' als negativ betrachten. Wenn die eine Ladung positiv und die andere negativ ist, so wird f negativ sein, oder die Kraft zwischen den Körpern wird eine Anziehung statt einer Abstossung sein. Wenn beide Ladungen positiv oder beide negativ sind, so wird die Kraft zwischen den Körpern eine Abstossung sein.

84. Definition. Die elektrische oder elektromotorische Kraft an einem Punkte ist die Kraft, welche auf einen kleinen Körper ausgeübt werden würde, der, mit der Einheit positiver Elektrizität geladen, an diesen Punkt gebracht werden würde, vorausgesetzt, daß die Elektrisierung des Systems durch die Gegenwart dieser Einheit der Elektrizität ungestört bleiben würde.

Wir wollen den deutschen Buchstaben $\mathfrak{E}$ als Symbol der elektrischen Kraft benutzen.

85. Kehren wir nun zurück zu dem Fall einer Kugel, deren Radius r ist, deren äußere Oberfläche gleichmäßig elektrisiert ist und bei der die Oberflächendichtigkeit der Elektrisierung σ ist. Wie wir bereits bewiesen haben, ist die gesamte Ladung der Kugel

$$e = 4\pi r^2 \sigma.$$

An einem Punkte außerhalb der Kugel, dessen Entfernung vom Mittelpunkte r' ist, ist die elektromotorische Kraft $\mathfrak{E}$ von dem Mittelpunkte weg gerichtet und ihr Wert ist

$$\mathfrak{E} = \frac{e}{r'^2}.$$

Ist der Punkt ganz nahe an der Oberfläche der Kugel, so ist $r' = r$ und

$$\mathfrak{E} = \frac{e}{r^2} = 4\pi\sigma$$

oder die elektrische Kraft an der Oberfläche einer elektrischen Kugel ist rechtwinkelig zu der Oberfläche und gleich der Oberflächendichtigkeit multipliziert mit 4π .

Wir haben bereits gesehen, daß in allen Fällen die elektrische Kraft an der Oberfläche eines Leiters rechtwinkelig zu dieser Oberfläche und proportional der Oberflächendichtigkeit ist. Wir finden jetzt, durch diesen speziellen Fall, daß das konstante Verhältniß der elektrischen Kraft zu der Oberflächendichtigkeit für eine gleichmäßig elektrisierte Kugel 4π ist und daher ist dies das Verhältniß für einen Leiter von irgend einer Form.

Die Gleichung

$$\mathfrak{E} = 4\pi\sigma$$

ist der vollständige Ausdruck des von Coulomb entdeckten Gesetzes, das in den Artikeln 47 und 81 angeführt wurde.

Wert des Potentials.

86. Wir müssen weiter die Werte des Potentials in verschiedenen Entfernungen von einem elektrischen Körper betrachten.

Definition. Das elektrische Potential an einem Punkte ist die Arbeit, welche aufgewendet werden muß, um einen mit der Einheit der Elektrizität geladenen Körper aus unendlicher Entfernung bis zu diesem Punkte zu bringen.

Wenn ψ das Potential in A und ψ' das in B ist, dann ist die Arbeit, welche von einem äußeren Agens geleistet werden muß, um die elektrische Kraft während des Transportes einer Elektrizitätseinheit von A nach B zu überwinden, $\psi' - \psi$.

Die GröÙe $\psi' - \psi$ würde auch die Arbeit darstellen, welche von den elektrischen Kräften geleistet würde, um die Einheit der Elektrizität von B nach A zu transportieren, wenn die Bewegung umgekehrt wäre.

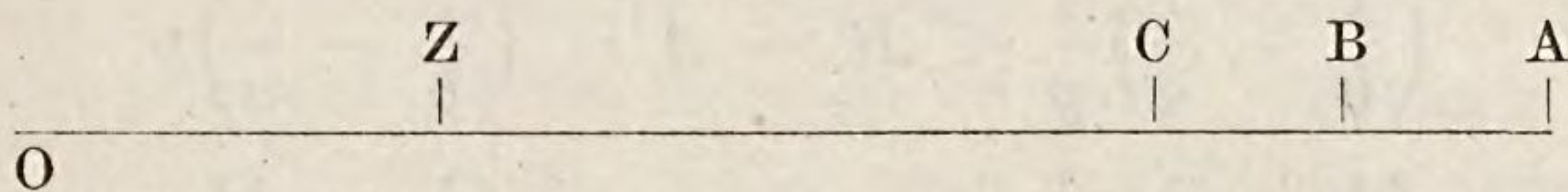
Wenn die Kraft von B bis A konstant und gleich $\mathfrak{E}$ wäre, dann wäre

$$\psi' - \psi = \overline{BA} \cdot \mathfrak{E}.$$

Im allgemeinen variiert die elektrische Kraft, wenn der Körper sich von B nach A bewegt, sodaß wir diese Methode nicht sofort anwenden können, um die Differenz der Potentiale zu finden. Aber, wenn

wir den Weg BA in eine hinreichende Anzahl von Teilen zerlegen, so können wir diese Teile so klein machen, daß die elektrische Kraft, während der Körper einen von diesen Teilen durchläuft, als konstant betrachtet werden kann. Wir können dann die Teile der Arbeit bestimmen, die in jedem Teile des Weges geleistet wird, und wenn wir sie zusammenaddieren, die ganze Arbeit erhalten, die während des Weges von B nach A geleistet ist.

Fig. 19.



Nehmen wir an, daß in O eine Einheit der Elektrizität sei und daß die Punkte $A, B, C \dots Z$ die Entfernungen $a, b, c \dots z$ von O haben. Die elektrische Kraft in A ist $\frac{1}{a^2}$, in B $\frac{1}{b^2}$ u. s. w., alle in der Richtung von O nach A .

Um die Arbeit zu finden, welche geleistet werden muß, um eine Elektrizitätseinheit von A nach B zu bringen, müssen wir die Strecke AB mit dem Mittelwerte der elektromotorischen Kraft an den verschiedenen Punkten zwischen A und B multiplizieren. Der kleinste Wert der Kraft ist $\frac{1}{a^2}$ und der größte $\frac{1}{b^2}$. Die gesuchte Arbeit ist also größer als $\frac{AB}{a^2}$ und kleiner als $\frac{AB}{b^2}$. Nun ist $AB = a - b$ und der wahre Wert der Arbeit ist der Überschufs des Potentials in B über das in A . Wenn wir daher jetzt $A, B, C \dots Z$ als Bezeichnung für die Potentiale an den entsprechenden Punkten nehmen, so können wir die Arbeit, die erforderlich ist, um die Elektrizitätseinheit von A nach B zu bringen, ausdrücken durch $B - A$. Diese Gröfse ist daher größer als

$$\frac{a - b}{a^2} \quad \text{oder} \quad \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) \frac{b}{a},$$

aber kleiner als

$$\frac{a - b}{b^2} \quad \text{oder} \quad \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) \frac{a}{b}.$$

Wir können das durch die doppelte Ungleichung ausdrücken

$$\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) \frac{b}{a} < B - A < \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) \frac{a}{b}.$$

Ebenso ist

$$\left(\frac{1}{c} - \frac{1}{b} \right) \frac{c}{b} < C - B < \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{b} \right) \frac{b}{c}$$

und so fort. Die Verhältnisse $\frac{a}{b}, \frac{b}{c}$ u. s. w. sind alle gröfser als eins. Nehmen wir an, dafs das gröfste von diesen Verhältnissen gleich p . Die Brüche $\frac{b}{a}$ u. s. w. sind das Reciproke der ersten; sie sind also alle kleiner als 1, aber nicht kleiner als $\frac{1}{p}$. Daher ist

$$\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a}\right) \frac{1}{p} < B - A < \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a}\right) p$$

$$\left(\frac{1}{c} - \frac{1}{b}\right) \frac{1}{p} < C - B < \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{b}\right) p$$

.

$$\left(\frac{1}{z} - \frac{1}{y}\right) \frac{1}{p} < Z - Y < \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{y}\right) p.$$

Addieren wir diese Ungleichungen, so finden wir

$$\left(\frac{1}{z} - \frac{1}{a}\right) \frac{1}{p} < Z - A < \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{a}\right) p.$$

Lassen wir die Zahl der Punkte zwischen A und Z wachsen und machen wir die Intervalle zwischen ihnen immer kleiner, so können wir das gröfste Verhältniss, p , so nahe an die Einheit bringen, wie wir wollen, und wir können daher behaupten, dafs, wenn die Linie AZ in immer kleinere Teile geteilt wird, die Gröfse p und ihr reciproker Wert $\frac{1}{p}$ sich der 1 als gemeinsamen Grenze nähern. Im Grenzfall wird also

$$Z - A = \frac{1}{z} - \frac{1}{a}.$$

Wir haben so die Differenz zwischen den Potentialen in A und Z gefunden. Um den wirklichen Wert des Potentials, z. B. in Z zu bestimmen, müssen wir auf die Definition des Potentials zurückgehen, dafs es die Arbeit ist, die aufgewendet wird, um eine Elektrizitätseinheit aus unendlicher Entfernung bis zu dem gegebenen Punkte zu bringen. Wir haben daher in dem obigen Ausdruck anzunehmen, dafs der Punkt A in unendlicher Entfernung von O ist. In diesem Falle ist das Potential A gleich Null und der reciproke Wert der Entfernung, oder $\frac{1}{a}$, ist auch Null. Die Gleichung reduziert sich also auf die Form

$$Z = \frac{1}{z}$$

oder in Worten: der numerische Wert des Potentials an einem gegebenen Punkte, welcher herrührt von einer Elektrizitätseinheit in gegebener Entfernung ist das Reciproke der Zahl, welche diese Entfernung darstellt.

Wenn die Ladung e ist, dann ist $\frac{e}{z}$ das Potential im Abstand z .

Das Potential, welches von einer Anzahl Ladungen herrührt, die in verschiedenen Entfernungen von dem gegebenen Punkte sich befinden, wird gefunden, wenn man die zu jeder einzelnen Ladung gehörenden Potentiale addiert, wobei man das Zeichen jedes Potentials berücksichtigt.

87. Da, wie wir gesehen haben, die elektrische Kraft an einem Punkte ausserhalb einer gleichmässig elektrisierten Kugelfläche dieselbe ist, als wenn die elektrische Ladung der Oberfläche in ihrem Mittelpunkt konzentriert wäre, so muß das von der elektrisierten Kugelfläche herrührende Potential für Punkte ausserhalb derselben sein

$$\psi = \frac{e}{r},$$

wo e die gesamte Ladung der Fläche und r der Abstand des gegebenen Punktes vom Mittelpunkte ist.

Es sei a der Radius der Kugelfläche, dann ist dieser Ausdruck für das Potential richtig, so lange r gröfser ist als a . An der Fläche selbst ist r gleich a . Das Potential an der Oberfläche, das von ihrer eigenen Elektrisierung herrührt, ist daher

$$\psi_a = \frac{e}{a}$$

(da keine Diskontinuität in dem Werte des Potentials zwischen der Fläche selbst und einem ausserhalb liegenden Punkte vorhanden sein kann).

Innerhalb der Fläche gibt es keine elektromotorische Kraft und das Potential ist daher für alle Punkte innerhalb der Kugel daselbe, wie auf der Oberfläche.

Wenn das Potential der Kugelfläche die Einheit ist, dann ist

$$e = a$$

oder die Ladung ist numerisch gleich dem Zahlenwerte.

Nun wird die elektrische Kapazität eines Körpers in einem gegebenen Felde gemessen durch die Ladung, welche ihr Potential auf die Einheit bringt. Es ist demnach die elektrische Kapazität einer in Luft befindlichen leitenden Kugel, die in beträchtlicher Entfernung von irgend einem anderen Leiter ist, dem Zahlenwerte nach gleich dem Radius der Kugel.

Wenn wir mittels eines Elektrometers das Potential der Kugel messen können, so können wir ihre Ladung bestimmen, indem wir dieses Potential mit dem Radius der Kugel multiplizieren. Diese Methode, eine Elektrizitätsmenge zu messen, wurde von Weber und Kohlrausch benutzt, als sie das Verhältnis der Einheiten bestimmten, welche man in elektromagnetischen und in elektrostatischen Untersuchungen annimmt. Da innerhalb einer gleichmäßig elektrisierten Kugel keine elektrische Kraft vorhanden ist, so ist das Potential innerhalb der Kugel konstant und gleich $\frac{e}{a}$.

88. Wir sind jetzt im Stande, die Theorie der Elektrisierung zweier konzentrischer Kugelflächen vollständig zu behandeln.

Es sei ein kugelförmiger Leiter mit dem Radius a isoliert innerhalb eines hohlen, leitenden Gefäßes, dessen innere Fläche eine Kugel vom Radius b konzentrisch mit der inneren Kugel sei. Die Ladung der inneren Kugel sei e , dann wird, wie wir bereits gesehen haben, die Ladung auf der inneren Fläche des Gefäßes sein $-e$. An irgend einem Punkte außerhalb beider Kugelflächen und im Abstände r vom Zentrum wird das von der inneren Kugel herrührende Potential sein $\frac{e}{r}$ und das von der äußeren Kugel herrührende $-\frac{e}{r}$. Da diese beiden Größen dem Zahlenwerte nach gleich, aber von entgegengesetztem Zeichen sind, so heben sie sich gegenseitig auf und das Potential an jedem Punkte, für welchen r größer als b ist, ist Null.

Zwischen den beiden Kugelflächen, in einem Punkte mit dem Abstände r vom Mittelpunkte, ist das von der inneren Kugel herrührende Potential $\frac{e}{r}$ und das von der äußeren Kugel herrührende $-\frac{e}{b}$. Das ganze Potential in diesem Zwischenraum ist also $e \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{b} \right)$.

An der Oberfläche der inneren Kugel ist $r = a$, so daß das Potential auf der inneren Kugel ist $e \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$.

Das Potential in allen Punkten innerhalb der inneren Kugel ist daselbe und gleich $e \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$.

Die Kapazität der inneren Kugel ist dem Zahlenwerte nach gleich dem Werte von e , wenn das Potential gleich der Einheit gemacht wird. In diesem Falle ist

$$e = \frac{1}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}} = \frac{ab}{b - a}$$

oder die Kapazität einer Kugel, die isoliert innerhalb einer konzentrischen Kugelfläche sich befindet, ist die vierte Proportionale zwischen dem Abstände der Kugelflächen ($b - a$) und den Radien (a, b) dieser Flächen.

Verringern wir den Abstand, $b - a$, zwischen den Flächen, so kann die Kapazität des Systems sehr groß gemacht werden, ohne dass man sehr große Kugeln benutzt.

Dieses Beispiel kann dazu dienen, um das Prinzip der Leydener Flasche zu erläutern, welche aus zwei metallischen, durch ein isolierendes Material getrennten Flächen besteht. Je kleiner der Abstand zwischen den Flächen und je größer die Flächen selbst sind, desto größer ist die Kapazität der Flasche.

Wenn daher eine elektrische Maschine, welche einen Körper bis zu einem gegebenen Potential laden kann, angewendet wird, um eine Leydener Flasche zu laden, deren eine Fläche mit der Erde verbunden ist, so wird sie, wenn sie lange genug arbeitet, der Flasche eine viel größere Ladung mitteilen, als sie einem sehr großen isolierten Körper mitteilen würde, der in großer Entfernung von allen anderen Leitern sich befindet.

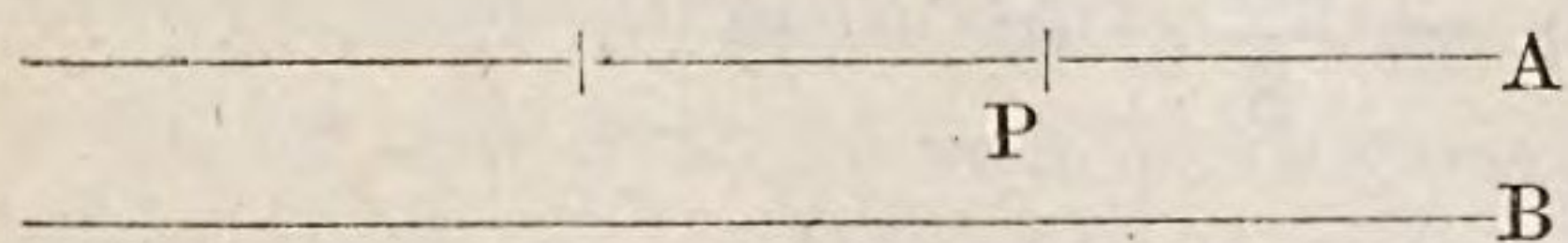
Die Kapazität der Flasche hängt jedoch ebenso auch von der Natur des Dielektrikums ab, welches zwischen den beiden metallischen Flächen sich befindet, wie von der Dicke und dem Flächeninhalt. Siehe Art. 161 u. f.

Zwei parallele Ebenen.

89. Ein anderer einfacher Fall der Elektrizitätsverteilung ist der, dass die Elektroden zwei parallele ebene Flächen im Abstände c sind. Wir wollen die Dimensionen dieser Flächen als sehr groß im Vergleich zu ihrem Abstände voraussetzen, und wir wollen die elektrische Wirkung nur in demjenigen Teile des Raumes zwischen den Ebenen betrachten, dessen Abstand von den Ecken der Platte vielmal größer ist als c .

Es sei A das Potential auf der oberen Ebene in der Figur, und B

Fig. 20.



das der unteren Ebene. Dann ist die elektrische Kraft an irgend einem Punkte P zwischen den Ebenen, der aber

nicht in der Nähe der Ecken der Ebenen ist, $\frac{A - B}{c}$, und sie wirkt von A nach B . Die elektrische Dichtigkeit auf der oberen Ebene findet sich nach Coulombs Gesetz, indem man diese Größe durch 4π dividiert.

$$e = \sqrt{\frac{FS}{2\pi}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (9)$$

In diesem Ausdruck wird F , die auf die Fläche S wirkende Anziehungskraft, im dynamischen Mafs aus der Beobachtung ihrer Wirkungen bestimmt. S ist der Inhalt der Fläche und π das Verhältniß des Kreisumfangs zum Durchmesser.

Die Differenz der Potentiale, A und B , der beiden Ebenen, läßt sich leicht durch e mittels der Gleichung (2) ausdrücken, nämlich

$$A - B = \frac{4 \pi c e}{S} = c \sqrt{\frac{8 \pi F}{S}} \cdot \cdot \cdot \cdot (10)$$

91. In Sir William Thomson's Schutzringepektrometern befindet sich eine Scheibe von der Einrichtung, daß in ihrer gewöhnlichen Lage ihre Fläche einen Teil einer viel größeren ebenen Fläche bildet, die sich nach allen Seiten von der Scheibe aus auf beträchtliche Entfernung hin erstreckt. Der Teil dieser Fläche, welcher außerhalb der beweglichen Scheibe ist, wird der Schutzring (*Guard Ring*) genannt, und die Fläche der Scheibe und des Schutzringes zusammen können als die Fläche einer großen Scheibe betrachtet werden, von der ein Teil, nahe an ihrem Mittelpunkte, beweglich ist. Gegenüber dieser Scheibe steht eine andere Scheibe, deren Fläche parallel der ersten ist und die viel größer ist als die bewegliche Scheibe. Die Elektrisierung der beweglichen Scheibe ist dann dieselbe, wie die eines kleinen Teiles von einer der beiden großen, einander gegenüberstehenden Flächen, und zwar eines Teiles, der in beträchtlicher Entfernung von den Ecken der Ebene ist, und man braucht nur sehr kleine Korrekturen anzuwenden, um die eben gegebenen Formeln auf den Fall der beweglichen Scheibe anzuwenden.

Die Verteilung der Elektrizität und der elektrischen Kraft in der Nähe der Ecken der grossen Scheiben ist durchaus nicht so einfach. Sie ist in Art. 202 meines gröfseren Werkes berechnet und die Kraftlinien und Flächen gleichen Potentials sind auf Tafel V am Ende dieses Buches zu sehen.

92. Die direkte Aufgabe der Elektrostatik, die Aufgabe, welche durch jedes elektrostatische Experiment uns gestellt wird, läßt sich folgendermaßen aussprechen:

Es ist ein System von isolierten Leitern nach Gestalt und Lage gegeben, ferner ist die Ladung jedes Leiters gegeben; gesucht wird die Verteilung der Elektrizität auf jedem Leiter und das elektrische Potential an einem Punkte des Feldes.

Die mathematischen Schwierigkeiten der Lösung dieser Aufgabe sind bis jetzt nur in einer kleinen Anzahl von Fällen überwunden worden und nur durch das Studium der, wie wir sagen können,

umgekehrten Aufgabe haben wir die Resultate erlangt, welche wir besitzen.

In der umgekehrten Aufgabe ist eine mögliche Verteilung des Potentials gegeben, und man sucht die Gestalten, Lagen und Ladungen eines Systems von Leitern zu finden, welche mit dieser Verteilung des Potentials verträglich sind.

Eine Anzahl von Lösungen dieser letzteren Aufgabe kann man erhalten, wenn man statt der ursprünglichen Verteilung der elektrischen Körper eine Reihe von Flächen gleichen Potentials nimmt, welche diese umgeben, und wenn man diese Flächen als Oberflächen von Leitern annimmt, wobei die Ladung jedes Leiters gleich der Summe der Ladungen aller Körper in der ursprünglichen Verteilung ist, welche von dieser neuen Fläche eingeschlossen sind.

Jede elektrische Aufgabe, deren Lösung wir kennen, ist durch einen umgekehrten Prozeß dieser Art konstruiert worden. Es ist daher für den Elektriker von großer Wichtigkeit zu wissen, welche Resultate auf diesem Wege erhalten worden sind, da die einzige Methode, durch welche er ein neues Problem zu lösen hoffen kann, die ist, daß er es auf einen der Fälle reduziert, in welchem ein ähnliches Problem durch den umgekehrten Prozeß konstruiert wurde.

Die historische Kenntnis der Resultate kann auf zwei Weisen von Nutzen werden. Wenn wir uns ein Instrument auszudenken suchen, um elektrische Messungen mit der größten Genauigkeit zu machen, so können wir für die elektrischen Oberflächen solche Formen nehmen, daß sie den Fällen entsprechen, deren genaue Lösung wir kennen. Andererseits, wenn wir berechnen wollen, welches die Elektrisierung von Körpern sein wird, deren Formen gegeben sind, so können wir mit einem Falle anfangen, in welchem eine von den Flächen gleichen Potentials eine Form annimmt, die der gegebenen etwas ähnlich ist, und können dann durch ein Probierv Verfahren das Problem so modifizieren, bis es dem gegebenen Falle besser entspricht. Diese Methode ist natürlich, vom mathematischen Gesichtspunkte aus betrachtet, sehr unvollkommen, aber sie ist die einzige, welche wir haben, und wenn es uns nicht möglich ist unsere Bedingungen zu wählen, so können wir nur eine angenäherte Berechnung der Elektrisierung ausführen. Man sieht also, daß das, was wir brauchen, eine Kenntnis der Formen der Flächen gleichen Potentials und der Induktionslinien in so vielen verschiedenen Fällen ist, als wir nur zusammenbringen und im Gedächtnis behalten können. In gewissen Klassen von Fällen, z. B. in den auf die Kugel bezüglichen, können wir mit mathematischen Methoden vorgehen. In anderen Fällen dürfen wir nicht die untergeordnete Methode verschmähen, daß wir wirklich Probefiguren auf Papier zeichnen und diejenige auswählen, welche der gesuchten Figur am wenigsten unähnlich ist.

Diese letztere Methode, denke ich, kann auch in den Fällen von Nutzen sein, wo wir die exakte Lösung kennen; denn ich finde, daß die Anschauung der Formen der Flächen gleichen Potentials oft zu der richtigen Wahl einer mathematischen Methode der Lösung führt.

Ich habe deshalb einige Figuren von Systemen von Kraftlinien und Flächen gleichen Potentials gezeichnet, so daß der Leser sich selbst mit den Formen der Linien vertraut machen kann.

93. Auf der ersten Tafel am Ende dieses Buches haben wir die Flächen gleichen Potentials, welche zwei Punkte umgeben, die mit Elektrizitätsmengen derselben Art und im Verhältniß von 20 zu 5 geladen sind.

Hier ist jeder Punkt von einem System von Flächen gleichen Potentials umgeben, welche um so mehr kugelförmig werden, je kleiner sie werden; aber keine von ihnen ist genau eine Kugel. Wenn wir zwei von diesen Flächen, von denen jede eine Kugel umgibt, uns als Oberflächen zweier leitender Körper denken, die nahezu, aber nicht ganz, kugelförmig sind, und wenn wir diese Körper mit Elektrizität derselben Art, und zwar auch im Verhältniß von 4 zu 1 laden, dann wird die Figur die Flächen gleichen Potentials darstellen, wenn wir alle diejenigen auslöschen, welche innerhalb der beiden Körper gezogen sind. Aus der Figur sieht man, daß die Wirkung zwischen den Körpern dieselbe sein wird, wie die zwischen den beiden Punkten, die dieselbe Ladung haben. Diese Punkte liegen in jedem Körper nicht genau in der Mitte der Achse, sondern etwas weiter von dem anderen Körper entfernt als der Mittelpunkt.

Dieselbe Figur setzt uns in den Stand zu sehen, welches die Verteilung der Elektrizität auf einer der ovalen Figuren sein wird, welche, an dem einen Ende breiter als am anderen, beide Zentren umschließen. Ein solcher Körper wird, wenn er mit einer Ladung 25 versehen und Influenz von außen nicht unterworfen ist, die größte Oberflächendichtigkeit an dem schmalen Ende haben, eine kleinere am breiten Ende und die kleinste in einem Kreise, der etwas näher an dem schmalen Ende liegt, als an dem breiten.

Eine Fläche gleichen Potentials ist vorhanden (in der Figur ist sie durch eine punktierte Linie angegeben), welche aus zwei Schalen besteht, die sich in der Spitze *P* schneiden. Diese Spitze ist ein Gleichgewichtspunkt und die Oberflächendichtigkeit auf einem Körper mit einer Oberfläche dieser Form würde an diesem Punkte Null sein.

Die Kraftlinien bilden in diesem Falle zwei getrennte Systeme, die voneinander durch eine Fläche sechsten Grades getrennt sind (in der Figur ist sie durch eine punktierte Linie angegeben), eine Fläche, die durch den Gleichgewichtspunkt geht und ungefähr einer Schale eines zweischaligen Hyperboloids ähnlich ist.

Diese Figur kann auch als Darstellung für die Kraftlinien und Flächen gleichen Potentials gelten, die zu zwei mit gravitirender Materie erfüllten Kugeln gehören, deren Massen im Verhältniß von 4 zu 1 stehen.

94. Auf der zweiten Tafel haben wir wieder zwei Punkte, deren Ladungen im Verhältniß von 4:1 stehen, von denen aber die eine positiv, die andere negativ ist. In diesem Falle ist eine von den Flächen gleichen Potentials, nämlich die, welche dem Potential Null entspricht, eine Kugel. In der Figur ist sie durch den punktierten Kreis Q gekennzeichnet. Die Bedeutung dieser Kugelfläche wird sich zeigen, wenn wir zu der Theorie der elektrischen Bilder kommen werden.

Aus dieser Figur können wir sehen, daß, wenn zwei runde Körper mit Elektrizität entgegengesetzter Art geladen sind, sie sich ebenso anziehen wie zwei Punkte, die dieselbe Ladung haben, aber etwas näher an einander liegen als die Mittelpunkte der runden Körper.

Auch hier hat wieder eine von den Flächen gleichen Potentials, (die durch die punktierte Linie angezeigte), zwei Schalen, eine innere, die den Punkt mit der Ladung 5 umschließt, und eine äußere, die beide Körper umschließt. Die beiden Schalen treffen sich in einer Spitze P , welche ein Gleichgewichtspunkt ist.

Wenn die Oberfläche eines Leiters von der Form der äußeren Schale ist, ein rundlicher Körper, der, wie ein Apfel, eine kleine Einbuchtung an einem Ende seiner Achse hat, dann sind wir im Stande, wenn dieser Leiter elektrisiert ist, die Oberflächendichtigkeit in jedem Punkte desselben zu bestimmen. Am untersten Ende der Einbuchtung wird diese Dichtigkeit Null sein.

Um diese Fläche herum haben wir andere, die eine mehr abgerundete Einbuchtung haben, diese wird flach und verschwindet endlich in der Fläche gleichen Potentials, welche durch den mit M bezeichneten Punkt geht.

Die Kraftlinien in dieser Figur bilden zwei Systeme, die durch eine Fläche getrennt sind, welche durch den Gleichgewichtspunkt hindurchgeht.

Wenn wir Punkte auf der Achse jenseits des Punktes B betrachten, so finden wir, daß die resultierende Kraft abnimmt bis zu dem Doppelpunkte P , wo sie verschwindet. Dann ändert sie ihr Zeichen und erreicht ein Maximum in M . Dann wird sie allmählich immer kleiner.

Dieses Maximum indessen ist nur ein Maximum in Bezug auf die anderen Punkte auf der Achse. Denn wenn wir senkrecht auf der Achse eine Fläche errichten, so ist in Bezug auf die Nachbarpunkte in dieser Fläche M ein Punkt, an dem die Kraft ein Minimum hat.

95. Tafel III stellt die Flächen gleichen Potentials und Kraftlinien dar, welche von einem elektrischen Punkte in A mit der Ladung 10 herrühren. Der Punkt liegt in dem Felde einer Kraft, welche, bevor der elektrische Punkt eingeführt war, an jedem Punkte nach Richtung und Gröfse gleichförmig war. In diesem Falle sind diejenigen Kraftlinien, welche zu A gehören, innerhalb einer Rotationsfläche enthalten, welche eine asymptotische Cylinderfläche hat, deren Achse parallel der Richtung der ungestörten Kraftlinien ist.

Die Flächen gleichen Potentials haben jede eine asymptotische Ebene. Eine von den Flächen, die durch die punktierte Linie angegebene, hat eine konische Spitze und eine den Punkt A umgebende Schale. Die unterhalb dieser liegenden Flächen haben eine Schale mit einer Vertiefung gerade an der Achse. Die oberhalb liegenden Flächen haben einen ganz geschlossenen Teil um A herum und eine getrennte Schale mit einer leichten Einbiegung an der Achse.

Wenn wir eine von den Flächen unterhalb A als Oberfläche eines Leiters nehmen, und eine andere ein Stück weiter unter A als die Oberfläche eines anderen Leiters mit verschiedenem Potential nehmen, so wird das System von Linien und Flächen zwischen den beiden Leitern die Verteilung der elektrischen Kraft angeben. Wenn der untere Leiter sehr weit von A entfernt ist, so wird seine Oberfläche nahezu eben sein, sodafs wir hier die Lösung haben für die Verteilung der Elektrizität auf zwei Flächen, die beide nahezu eben und einander parallel sind, nur dafs die obere Fläche an ihrem Mittelpunkte einen Vorsprung hat, welcher mehr oder weniger stark ist, je nach der speziellen Linie gleichen Potentials, welche wir für die Oberfläche gewählt haben.

96. Tafel IV stellt die Flächen gleichen Potentials und Kraftlinien dar, die von drei elektrischen Punkten $A B C$ herrühren, wobei die Ladung von A 15 Einheiten positiver Elektrizität ist, die von B 12 Einheiten negativer Elektrizität und die von C 20 Einheiten positiver Elektrizität. Diese Punkte liegen auf einer geraden Linie, so dafs

$$AB = 9, \quad BC = 16, \quad AC = 25$$

ist.

In diesem Falle besteht die Oberfläche, für welche das Potential die Einheit ist, aus zwei Kugeln, deren Mittelpunkte A und C und deren Radien 15 und 20 sind. Diese Kugeln schneiden sich in dem Kreise, welcher die Ebene des Papiers in D und D' trifft, sodafs B der Mittelpunkt dieses Kreises und sein Radius 12 ist. Dieser Kreis ist ein Beispiel einer Gleichgewichtslinie; denn die resultierende Kraft verschwindet an jedem Punkte dieser Linie.

Wenn wir annehmen, dafs die Kugel, deren Mittelpunkt A ist, ein Leiter ist mit einer Ladung von drei Einheiten positiver Elek-

trizität und daß sie unter der Influenzwirkung von 20 Einheiten positiver Elektrizität in C steht, so wird dieser Fall auch durch unsere Figur dargestellt werden, wenn wir alle Linien innerhalb der Kugel A weglassen. Der innerhalb des kleinen Kreises DD' liegende Teil dieser Kugelfläche wird durch die Influenz von C negativ elektrisch sein. Der ganze Rest der Kugel wird positiv elektrisch sein und der kleine Kreis DD' selbst wird eine neutrale Linie sein, d. h. eine, auf der keine Elektrizität ist.

Wir können unsere Figur auch so ansehen, als ob sie die Elektrisierung einer Kugel mit dem Mittelpunkte C darstelle, wenn diese Kugel mit acht Einheiten positiver Elektrizität geladen und durch 15 Einheiten positiver Elektrizität in A influenziert ist.

Die Figur kann auch als Darstellung des Falles aufgefaßt werden, daß ein Leiter, dessen Oberfläche aus den größeren Segmenten der beiden Kugeln, die sich in DD' schneiden, besteht, mit 23 Einheiten positiver Elektrizität geladen ist.

97. Ich wünschte, daß diese Figuren als Erläuterungen zu Faradays Sprache aufgefaßt würden, wenn er von „Kraftlinien“, von „Kräften eines elektrischen Körpers“ u. s. w. spricht.

In der streng mathematischen Sprache wird das Wort Kraft gebraucht, um die supponierte Ursache des Strebens zu bezeichnen, welches ein materieller Körper zeigt, seinen Zustand der Ruhe oder Bewegung zu ändern. Es ist kein Unterschied, ob wir von diesem beobachteten Streben, oder von seiner unmittelbaren Ursache sprechen, da die Ursache einfach aus der Wirkung gefolgert wird und keinen anderen Beweis für sich hat.

Da wir jedoch selbst oft solche Thätigkeit ausüben, indem wir die Bewegung unseres eigenen Körpers leiten oder andere Dinge ebenso bewegen, so haben wir eine große Menge von bewußten Empfindungen erlangt, die sich auf diese Handlungen beziehen, und deshalb sind unsere Vorstellungen von Kraft in unserem Geiste verbunden mit den Vorstellungen eines bewußten Vermögens, einer Ausübung und Ermüdung, oder eines Überwindens oder Nachgebens gegen einen Druck. Diese Vorstellungen, welche der rein abstrakten Idee der Kraft etwas Farbigen und Lebhaftes geben, können in mathematisch geschulten Köpfen keinen praktischen Irrtum hervorrufen.

Aber in der gewöhnlichen Sprache in der Zeit, in der die Dynamik weniger bekannt war, wurden alle die Worte, die sich auf ein Wirken beziehen, wie Kraft, Energie, Wirkungsfähigkeit u. s. w. miteinander verwechselt, obwohl einige von den Scholastikern sich bemühten, eine größere Bestimmtheit in ihrer Sprache einzuführen.

Die Pflege und Popularisierung von korrekten dynamischen Vorstellungen seit der Zeit von Galilei und Newton hat eine ungeheure Änderung in der Sprache und den Vorstellungen des gewöhnlichen

Lebens hervorgebracht, aber erst in der neueren Zeit und in Folge der wachsenden Wichtigkeit des Maschinenwesens, geschieht es, daß die Begriffe Kraft, Energie und Wirkungsvermögen genau von einander unterschieden werden. Aber sehr wenige, gerade von den Gelehrten, beachten sorgfältig diese Unterschiede; daher hören wir oft von der Kraft einer Kanonenkugel sprechen, wenn ihre Energie oder ihr Moment gemeint wird und von der Kraft eines elektrischen Körpers, wenn die Menge seiner Elektrizität gemeint ist.

Nun wird die Menge der Elektrizität in einem Körper, nach Faradays Vorstellungen, durch die Zahl der Kraftlinien oder besser der Induktionslinien gemessen, welche von ihm ausgehen. Diese Kraftlinien müssen alle irgendwo enden, entweder auf benachbarten Körpern, oder auf den Wänden oder der Decke des Raumes, oder auf der Erde, oder auf den Himmelskörpern, und wo sie auch enden, dort befindet sich eine Elektrizitätsmenge, die genau gleich und entgegengesetzt ist derjenigen auf dem Teile des Körpers, von welchem die Induktionslinien ausgingen. Prüfen wir unsere Figuren, so werden wir sehen, daß das der Fall ist. Es herrscht daher kein Widerspruch zwischen Faradays Anschauungen und den mathematischen Resultaten der alten Theorie, sondern im Gegenteil, die Vorstellung der Kraftlinien wirft helles Licht auf diese Resultate und scheint die Mittel an die Hand zu geben, um durch einen kontinuierlichen Prozeß von den etwas starren Begriffen der alten Theorie zu Begriffen sich zu erheben, welche einer größeren Dehnbarkeit fähig sind, so daß sie für die Vermehrung unserer Kenntnisse durch weitere Untersuchungen Raum schaffen.

98. Diese Figuren werden auf folgende Weise konstruiert.

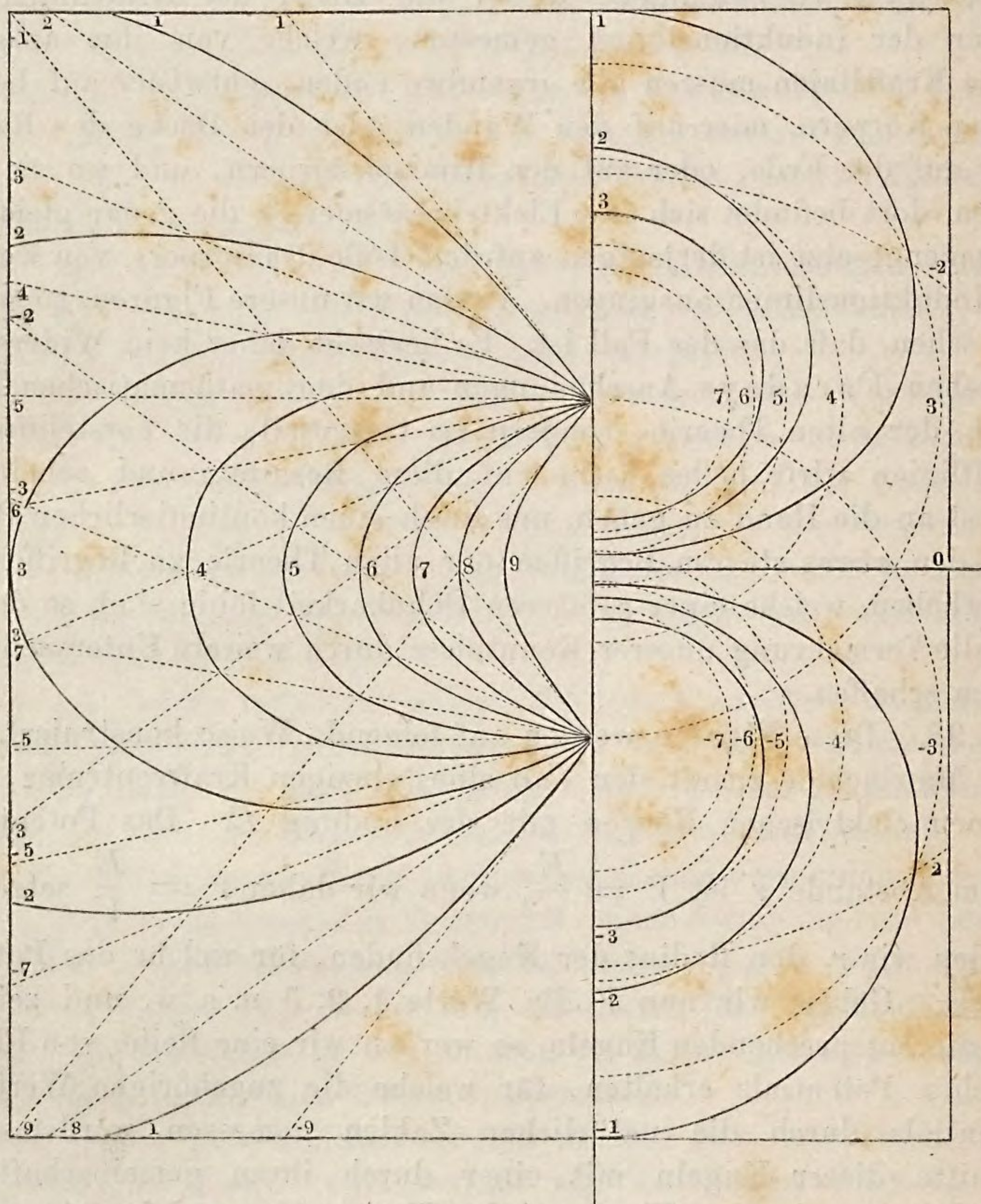
Man nehme zuerst den Fall eines einzigen Kraftzentrums, einen kleinen elektrischen Körper mit der Ladung E . Das Potential in einem Abstände r ist $V = \frac{E}{r}$; wenn wir daher $r = \frac{E}{V}$ setzen, so

werden wir r , den Radius der Kugel, finden, für welche das Potential V ^{ist.} aus. Geben wir nun V die Werte 1, 2, 3 u. s. w. und zeichnen wir die entsprechenden Kugeln, so werden wir eine Reihe von Flächen gleichen Potentials erhalten, für welche die zugehörigen Werte des Potentials durch die natürlichen Zahlen gemessen werden. Die Schnitte dieser Kugeln mit einer durch ihren gemeinschaftlichen Mittelpunkt gehenden Ebene werden Kreise sein, welche wir mit den Zahlen bezeichnen können, die das Potential auf einem jeden angeben. Diese sind durch die punktierten Kreise auf der rechten Seite der Figur 21 (a. f. S.) angegeben.

Wenn noch ein anderes Kraftzentrum vorhanden ist, so können wir in derselben Weise die zu diesem gehörenden Flächen gleichen Potentials ziehen, und wenn wir jetzt die Gestalt der Flächen gleichen

Potentials finden wollen, die zu beiden Zentren zusammengehören, so müssen wir uns daran erinnern, daß, wenn V_1 das von einem Zentrum herrührende Potential ist, und V_2 das vom anderen, daß dann das von beiden Zentren herrührende Potential sein wird $V_1 + V_2 = V$. Da wir nun für jeden Schnitt der Flächen gleichen Potentials, die zu den beiden Reihen gehören, sowohl V_1 als auch V_2 kennen, so kennen wir auch den Wert von V . Wenn wir daher eine Fläche zeichnen,

Fig. 21.



welche durch alle diejenigen Schnitte geht, für welche der Wert von V derselbe ist, so wird diese Fläche mit einer wirklichen Fläche gleichen Potentials an allen diesen Schnitten übereinstimmen, und wenn die ersten Systeme von Flächen hinreichend nahe aneinander gezogen worden sind, so kann die neue Fläche mit jedem gewünschten

Grade von Genauigkeit gezeichnet werden. Die Flächen gleichen Potentials, die zu zwei Punkten gehören, deren Ladungen gleich und entgegengesetzt sind, sind durch die ausgezogenen Linien auf der rechten Seite der Figur 21 dargestellt.

Diese Methode kann angewendet werden, um irgend ein System von Flächen gleichen Potentials zu zeichnen, wenn das Potential die Summe zweier Potentiale ist, für welche wir die Flächen gleichen Potentials schon gezeichnet haben.

Die von einem einzigen Kraftzentrum herrührenden Kraftlinien sind gerade Linien, die von diesem Zentrum ausgehen. Wenn wir durch diese Linien sowohl die Intensität als die Richtung der Kraft an einem Punkte darstellen wollen, so müssen wir sie so ziehen, daß sie aus den Flächen gleichen Potentials Teile ausschneiden, über welche ausgedehnt das Oberflächenintegral der Induktion bestimmte Werte hat. Der beste Weg, dies zu thun, ist der, daß wir annehmen, unsere ebene Figur sei der Schnitt einer Raumfigur, die durch die Umdrehung der ebenen Figur um eine durch das Kraftzentrum gehende Achse gebildet wird. Irgend eine gerade, von dem Zentrum ausgehende Linie, die mit der Achse den Winkel ϑ bildet, wird dann einen Kegel ausschneiden, und das Oberflächenintegral der Induktion, über den Teil einer Oberfläche, die durch diesen Kegel auf der an der positiven Richtung der Achse liegenden Seite ausgeschnitten ist, ist $2\pi E(1 - \cos \vartheta)$.

Wenn wir weiter annehmen, daß diese Fläche durch ihren Schnitt mit zwei Ebenen begrenzt ist, die durch die Achse gehen und die unter einem Winkel gegeneinander geneigt sind, dessen Bogen gleich der Hälfte des Radius ist, dann ist die Induktion durch die so begrenzte Fläche

$$E(1 - \cos \vartheta) = 2\psi$$

und

$$\vartheta = \arccos. \left(1 - \frac{2\psi}{E}\right).$$

Geben wir jetzt dem ψ eine Reihe von Werten $1, 2, 3 \dots E$, so werden wir eine entsprechende Reihe von Werten ϑ finden und wenn E eine ganze Zahl ist, so wird die Zahl der entsprechenden Kraftlinien, inklusive der Achse gleich E sein.

Wir haben daher eine Methode, um Kraftlinien so zu ziehen, daß die Ladung irgend eines Zentrums durch die Anzahl der Linien angegeben wird, welche zu ihm hin zusammenlaufen und die Induktion durch eine Fläche, welche in der beschriebenen Weise ausgeschnitten ist, wird durch die Zahl der Kraftlinien gemessen, welche durch sie hindurchgehen. Die punktierten geraden Linien auf der linken Seite der Figur 21 stellen die Kraftlinien dar, die zu jedem der beiden elektrisierten Punkte mit den Ladungen 10 und -10 gehören.

Wenn zwei Kraftzentra auf der Achse der Figur vorhanden sind, so können wir die Kraftlinien für jeden Punkt entsprechend den Werten von ψ_1 und ψ_2 ziehen, und wenn wir dann die Linien durch die aufeinander folgenden Schnitte dieser Linien ziehen, für welche der Wert von ψ_1 und ψ_2 derselbe ist, so können wir die zu beiden Zentren gehörenden Kraftlinien finden und ebenso können wir irgend zwei Systeme von Kraftlinien kombinieren, welche symmetrisch um die Achse herum liegen. Die ausgezogenen Kurven auf der linken Seite der Figur 21 stellen die Kraftlinien dar, die zu den beiden zugleich wirkenden elektrischen Punkten gehören.

Nachdem die Flächen gleichen Potentials und die Kraftlinien nach dieser Methode konstruiert sind, kann man die Genauigkeit der Zeichnung prüfen, indem man untersucht, ob die beiden Systeme von Linien überall orthogonal sind und ob der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Flächen gleichen Potentials sich zu dem Abstande zwischen zwei aufeinander folgenden Kraftlinien verhält, wie die halbe Entfernung von der Achse zu der angenommenen Längeneinheit.

In dem Falle eines solchen Systems von endlichen Dimensionen hat die Kraftlinie, deren Indexzahl ψ ist, eine Asymptote, welche durch den Schwerpunkt des Systems geht, und welche gegen die Achse unter einem Winkel geneigt ist, dessen Kosinus $1 - 2 \frac{\psi}{E}$ ist, wo E die gesamte Elektrizität des Systems ist, falls ψ kleiner als E ist. Die Kraftlinien, deren Index gröfser als E ist, sind begrenzte Linien.

Die Kraftlinien, die einem Felde einer gleichförmigen, parallel der Achse wirkenden Kraft entsprechen, sind Linien, parallel der Achse, deren Abstände von der Achse die Quadratwurzeln einer arithmetischen Reihe sind.

Anmerkung des Übersetzers: Die Entwicklungen in 98, welche aus dem grofsen Werke von Maxwell entnommen sind, sind nicht in derselben elementaren Weise gehalten, wie die übrigen Entwicklungen dieses Buches. Ich habe jedoch nicht geglaubt, in ein Werk von Maxwell eine eigene elementare Darstellung der obigen Sätze einfügen zu dürfen, obwohl diese möglich und für das bessere Verständnifs vielleicht zweckmäfsig wäre.

Siebentes Kapitel.

Theorie der elektrischen Bilder.

99. Die Berechnung der Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche eines Leiters, wenn sich in seiner Nähe elektrische Körper befinden, ist im allgemeinen eine Aufgabe, für die die bisherigen mathematischen Methoden nicht ausreichen.

Wenn der Leiter eine Kugel ist und wenn die Verteilung der Elektrizität auf den äusseren Körpern gegeben ist, so kennt man durch Poisson eine Lösung, die auf eine unendliche Reihe führt. Die Lösung stimmt mit derjenigen überein, welche später Sir W. Thomson in weit einfacherer Form gab und welche die Grundlage seiner Methode der elektrischen Bilder ist.

Mittels dieser Methode hat er Probleme der Elektrizität gelöst, welche mit anderen Methoden gar nicht in Angriff genommen waren und welche selbst, nachdem er die Lösung ausgeführt hat, mit keiner anderen Methode angreifbar zu sein scheinen. Diese Methode hat den grossen Vorteil, dass sie mit Hilfe von ganz elementaren mathematischen Schlüssen zu verstehen ist, namentlich wenn man sie in Verbindung mit den Figuren der Flächen gleichen Potentials betrachtet, die in Art. 93 bis 96 beschrieben sind.

100. Die Vorstellung eines Bildes erhält man am leichtesten, wenn man die optischen Erscheinungen betrachtet, bei welchen der Ausdruck „Bild“ zuerst in die Wissenschaft eingeführt wurde.

Wir sind gewohnt von den sichtbaren Eindrücken, die wir durch unsere Augen empfangen, Gebrauch zu machen, um die Lage von entfernten Objekten zu bestimmen. Wir thun dies den ganzen Tag hindurch in einer für gewöhnliche Zwecke hinreichend genauen Weise. Feldmesser und Astronomen thun dasselbe mit Hilfe von künstlichen

Instrumenten und mathematischen Ableitungen mit gröfserer Genauigkeit. Auf welche Weise wir aber auch unsere Schlüsse ziehen, wir finden, dafs sie in Übereinstimmung sind mit der Hypothese, dafs ein Objekt an einer gewissen Stelle des Raumes existiert, ein Objekt, welches Licht aussendet, welches in geraden Linien zu unseren Augen oder zu unseren Instrumenten kommt.

Aber wenn wir vor einem ebenen Spiegel stehen und Beobachtungen über die scheinbare Richtung der von ihm reflektierten Objekte machen, so finden wir, dafs diese Beobachtungen in Übereinstimmung sind mit der Hypothese, dafs gar kein Spiegel da ist, sondern dafs gewisse Objekte in dem Raume hinter der Ebene des Spiegels vorhanden sind. Diese hypothetischen Objekte stehen geometrisch in Beziehung zu gewissen reellen Objekten vor der Ebene des Spiegels, und sie werden die Bilder dieser Objekte genannt.

Wir sind nicht mit einem besonderen Sinne ausgestattet, welcher uns befähigte, die Anwesenheit und die Lage von entfernten Körpern mittels ihrer elektrischen Wirkungen zu bestimmen, aber wir haben instrumentelle Methoden, durch welche wir die Verteilung des Potentials und der elektrischen Kraft in jedem Teile des Feldes bestimmen können, und aus diesen Daten erhalten wir eine gewisse bestimmte Vorstellung über die Lage und Elektrisierung des entfernten Körpers.

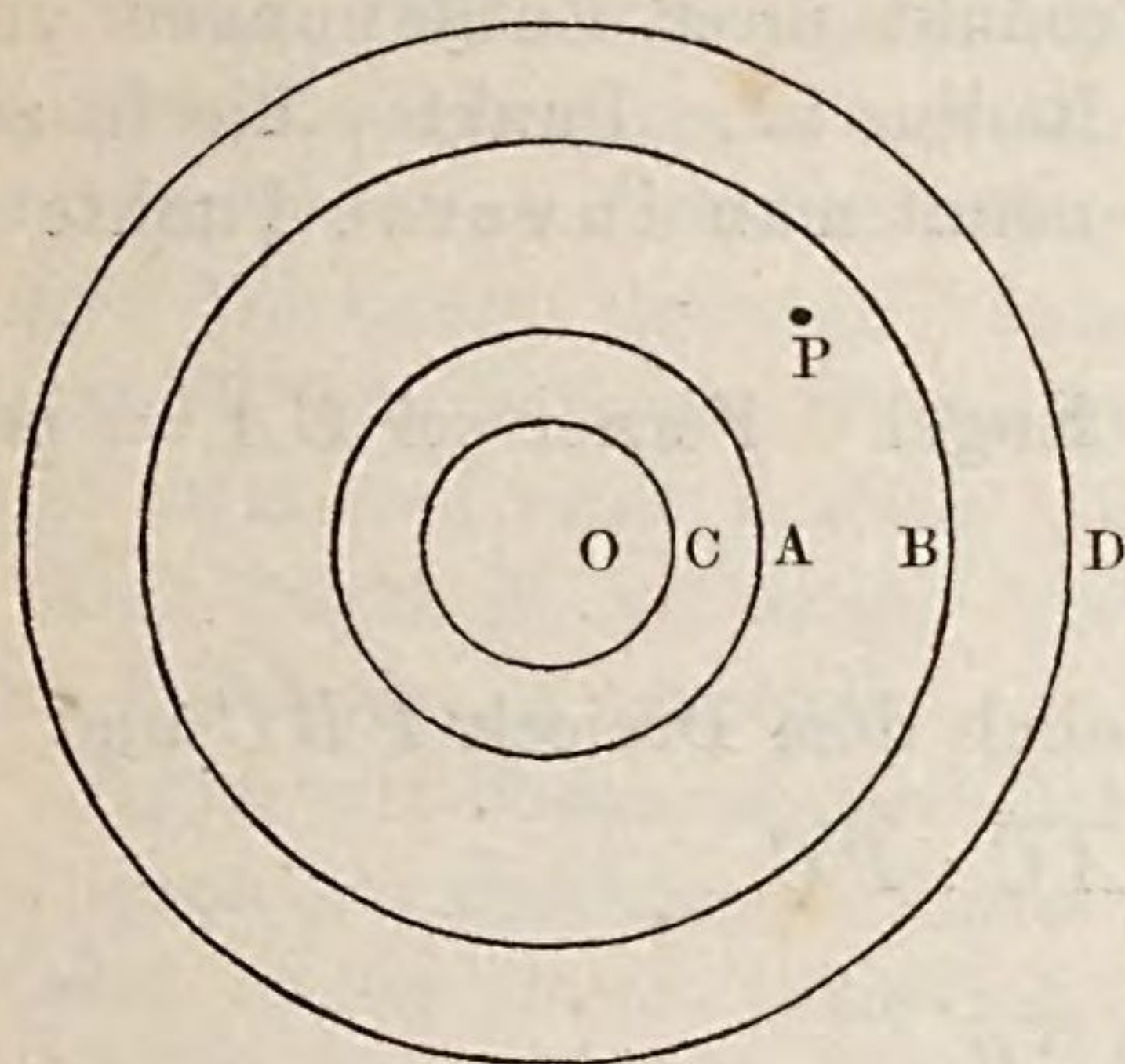
Wenn ein Astronom z. B. die Richtung und Gröfse der Schwerkraft in jedem beliebigen Punkte des Himmelsraumes bestimmen könnte, so könnte er die Lagen und Massen der Körper ableiten, von welchen die Kraft herrührt. Als Adams und Leverrier den bis dahin unbekannten Planeten Neptun entdeckten, so thaten sie dies, indem sie die Richtung und Gröfse der Schwerkraft an gewissen Stellen des Raumes bestimmten, die von dem unsichtbaren Planeten herrührte. Bei dem elektrischen Problem benutzen wir ein elektrisches Markkugélchen, welches wir nach Belieben in dem Felde bewegen. Die Astronomen brauchten für einen ähnlichen Zweck den Planeten Uranus, über welchen sie allerdings keine Gewalt hatten, der sich aber selbst in solche Stellungen begab, dafs die Veränderungen der Elemente seines Umlaufes dazu dienten, um die Lage des unbekannten störenden Planeten anzugeben.

101. In dem einen der elektrischen Systeme, welche wir bereits untersucht haben, nämlich da, wo ein kugelförmiger Leiter A innerhalb eines konzentrischen, kugelförmigen, leitenden Gefäfses B war, haben wir einen der einfachsten Fälle des Prinzips der elektrischen Bilder.

Das elektrische Feld ist in diesem Falle der Raum, welcher zwischen den beiden konzentrischen Kugelflächen liegt. Die elektrische Kraft in einem Punkte P innerhalb dieses Raumes hat die Richtung des Radius OP und ist dem Zahlenwerte nach gleich der Ladung der

inneren Kugel, A , dividiert durch das Quadrat der Entfernung, OP , des Punktes von dem gemeinsamen Mittelpunkt. Es ist daher einleuchtend, daß die Kraft innerhalb dieses Raumes dieselbe sein wird, wenn wir statt der elektrischen Kugelflächen A und B irgend zwei andere konzentrische Kugelflächen C und D substituieren, von denen

Fig. 22.



die eine C innerhalb der kleineren Kugel A liegt und die andere D außerhalb von B , wobei aber die Ladung von C gleich der von A in dem früheren Falle ist. Die elektrischen Erscheinungen in dem Raume zwischen A und B sind daher dieselben wie früher; der einzige Unterschied zwischen diesen Fällen ist der, daß wir jetzt in dem Raume zwischen A und C und ebenso in dem Raume zwischen C und D elektrische Kräfte finden, die nach demselben Gesetze wirken wie in dem Raume zwischen A und

B , während früher, als der Raum durch die leitenden Flächen A und B begrenzt war, in dem Raume innerhalb und außerhalb dieser Flächen gar keine elektrische Kraft vorhanden war. Wir können sogar für mathematische Zwecke die innere Kugel C bis auf einen physikalischen Punkt in O reduziert denken und die äußere Kugel D bis in die Unendlichkeit ausgedehnt denken, und so vergleichen wir die elektrische Kraft in dem Raume zwischen A und B mit derjenigen, die von einem elektrischen Punkte in O im unendlichen Raume herührt.

Man sieht also, daß, wenn eine Kugelfläche gleichmäßig elektrisiert ist, die elektrischen Erscheinungen in dem Raume außerhalb der Kugel genau dieselben sind, wie wenn die Kugelfläche fort wäre und ein sehr kleiner Körper in den Mittelpunkt der Kugel gebracht wäre, der dieselbe elektrische Ladung hat, wie die Kugel.

Dies ist ein einfaches Beispiel, in welchem die Erscheinungen in einem gewissen Sinne verträglich sind mit einer falschen Hypothese über das, was außerhalb dieses Raumes existiert. Die Wirkung einer gleichmäßig elektrisierten Kugelfläche in dem Raume außerhalb dieser Fläche ist derart, daß die Erscheinungen auch einem gedachten elektrischen Punkte im Mittelpunkte der Kugel zugeschrieben werden können.

Das Potential ψ einer Kugel vom Radius a , die sich im unendlichen Raume befindet und mit der Elektrizitätsmenge e geladen ist,

ist $\frac{e}{a}$. Wenn daher ψ das Potential unserer Kugel ist, so ist die gedachte Ladung ihres Mittelpunkts gleich ψa .

102. Nun wollen wir das Potential in einem Punkte P auf einer Kugelfläche berechnen, deren Zentrum C und deren Radius $\overline{CP}$ ist, wenn dieses Potential von zwei elektrischen Punkten A und B auf demselben Radius (oder seiner Verlängerung) herrührt, wobei aber die Punkte so liegen sollen, daß das Produkt ihrer Entfernungen vom Mittelpunkte gleich dem Quadrat des Radius ist. Punkte, die in solcher Beziehung zu einander stehen, nennt man inverse Punkte in Bezug auf die Kugel (s. Fig. 23).

Es sei $a = \overline{CP}$ der Radius der Kugel. Ferner sei $\overline{CA} = m a$, dann wird $\overline{CB} = \frac{a}{m}$ sein.

Ferner ist das Dreieck APC ähnlich dem Dreieck PBC und

$$\overline{AP} : \overline{PB} = \overline{AC} : \overline{PC}$$

also

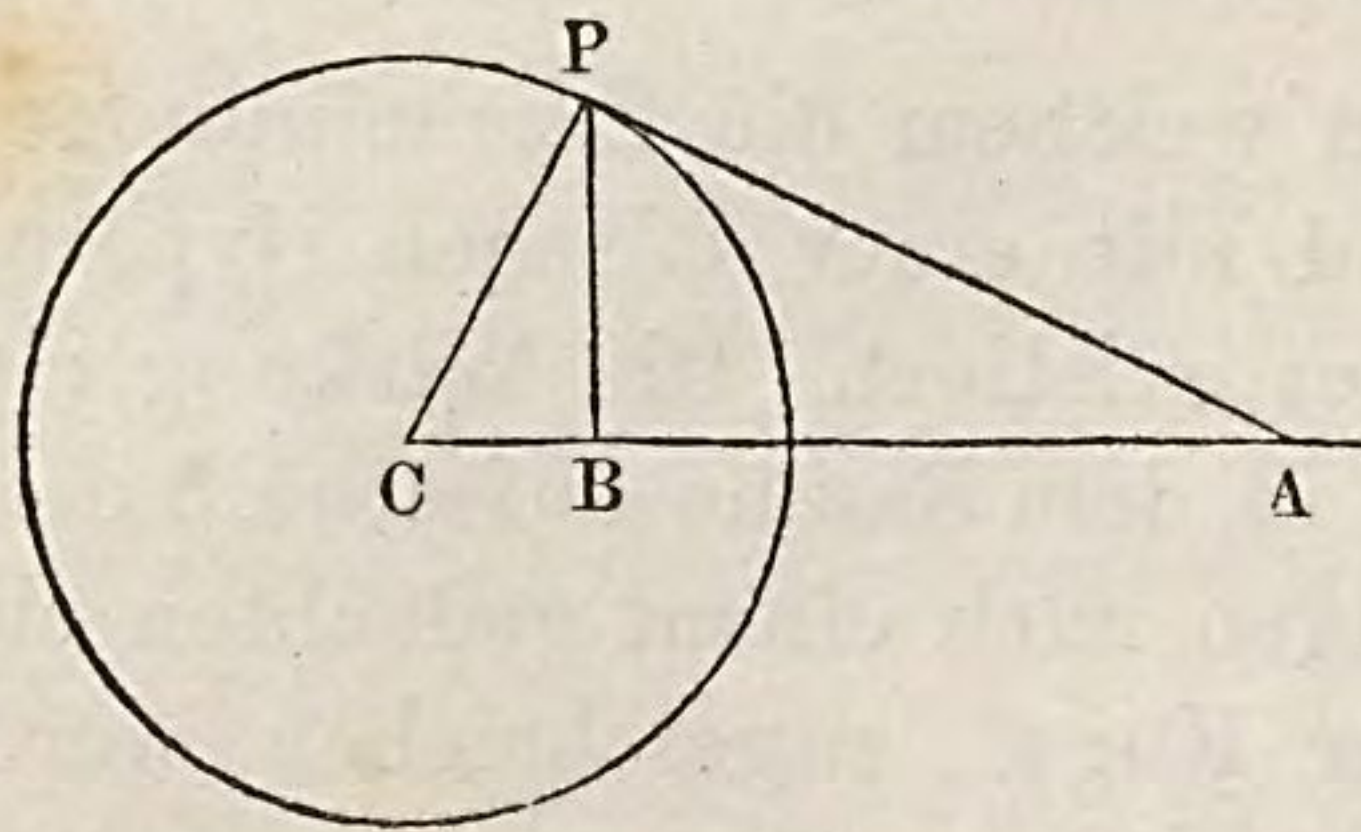
$$\overline{AP} = m \overline{PB}.$$

Nun sei in A eine elektrische Ladung gleich e , und in B sei eine Ladung $e' = -\frac{e}{m}$ von entgegengesetzter Art. Das von diesen beiden Ladungen herrührende Potential in P wird sein

$$\begin{aligned} V &= \frac{e}{\overline{AP}} + \frac{e'}{\overline{BP}} \\ &= \frac{e}{m \overline{PB}} - \frac{e}{m \overline{PB}} \\ &= 0, \end{aligned}$$

also das Potential an einem Punkte P auf der Kugelfläche, welches von den beiden Ladungen in A und B herrührt, ist Null.

Fig. 23.



Wir können jetzt annehmen, daß die Kugelfläche eine dünne Schale aus Metall ist. Ihr Potential ist bereits an jedem Punkte Null, sodafs, wenn wir sie durch einen feinen Draht mit der Erde verbinden, keine Änderung ihres Potentials eintreten wird und daher wird das Potential in jedem Punkte, sowohl innerhalb als aufserhalb der

Fläche, ungeändert bleiben, und es wird genau das sein, welches von zwei elektrischen Punkten A und B herrührt.

Wenn wir jetzt die metallische Schale in Verbindung mit der Erde halten und den elektrischen Punkt B wegnehmen, so wird das Potential an jedem Punkte innerhalb der Kugel Null sein, aber außerhalb wird es so wie früher bleiben. Denn die Fläche der Kugel bleibt noch auf demselben Potential und in der Verteilung der elektrischen Körper in dem Raume außerhalb der Kugel ist gar keine Veränderung eingetreten.

Wenn daher ein elektrischer Punkt A außerhalb eines kugelförmigen Leiters vom Potential Null liegt, so wird die elektrische Wirkung in allen Punkten außerhalb der Kugel äquivalent sein derjenigen Wirkung, die vom Punkte A zusammen mit einem anderen Punkte B , innerhalb der Kugel, herrührt. Der Punkt B ist der inverse Punkt zu A und seine Ladung verhält sich zu der von A wie -1 zu m . Der Punkt B mit seiner gedachten Ladung wird das elektrische Bild von A genannt.

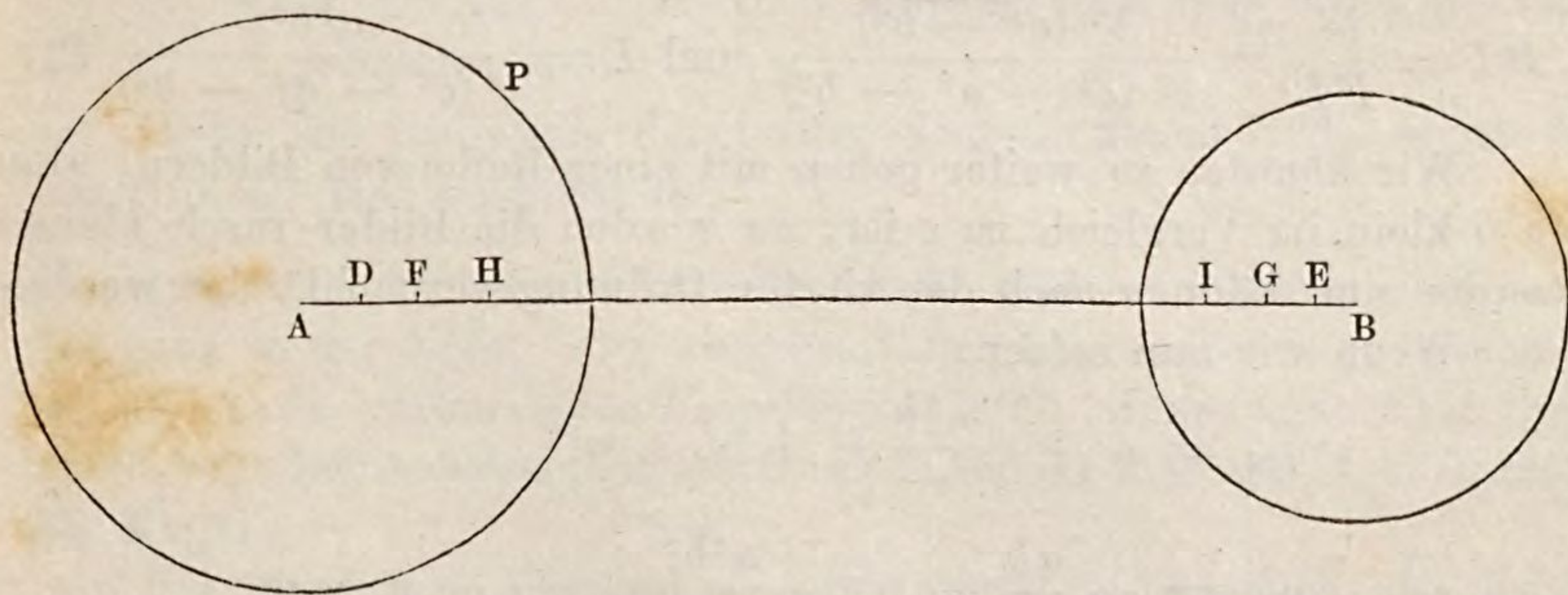
Wenn wir ebenso A entfernen und B behalten, können wir zeigen, daß, wenn ein elektrischer Punkt B innerhalb eines hohlen Leiters sich befindet, dessen innere Oberfläche kugelförmig ist, daß dann die elektrische Wirkung in dem Hohlraume äquivalent ist der des Punktes B zusammen mit einem gedachten Punkte A , außerhalb der Kugel, dessen Ladung sich zu der von B wie m zu -1 verhält.

Wenn die Kugel, statt mit der Erde in Verbindung und also auf dem Potential Null zu sein, auf dem Potential ψ ist, so werden die elektrischen Wirkungen außerhalb der Kugel dieselben sein, wie wenn zu dem Bilde des elektrischen Punktes noch eine andere gedachte Ladung gleich ψa hinzukäme, die im Mittelpunkte der Kugel läge.

Innerhalb der Kugel wird das Potential einfach um ψ vergrößert.

103. Als ein Beispiel der Methode der elektrischen Bilder wollen wir den elektrischen Zustand zweier Kugeln berechnen, deren Radien

Fig. 24.



bezüglich a und b sind, deren Potentiale P_a und P_b sind und deren Mittelpunkte den Abstand c haben.

Wir wollen annehmen, dass b klein im Vergleich zu c ist.

Wir können die thatsächlichen elektrischen Wirkungen in einem Punkte außerhalb der beiden Kugeln so auffassen, als ob sie von einer Reihe von elektrischen Bildern herrühren.

Erstens müssen wir, da das Potential der Kugel A gleich P_a ist, ein Bild in den Mittelpunkt A legen mit einer Ladung $a P_a$.

Ebenso müssen wir in B , den Mittelpunkt der anderen Kugel, eine Ladung $b P_b$ legen. Jedes von diesen Bildern wird ein Bild zweiter Ordnung in der anderen Kugel haben. Das Bild von B in der Kugel a wird in D liegen, wo

$$AD = \frac{a^2}{c} \text{ und die Ladung } D = -\frac{a}{c} b P_b \text{ ist.}$$

Das Bild von A in der Kugel b wird in E sein, wo

$$BE = \frac{b^2}{c} \text{ und die Ladung } E = -\frac{b}{c} a P_a \text{ ist.}$$

Jeder von diesen Punkten wird ein Bild der dritten Ordnung haben. Das Bild von E in a wird in F liegen, wo

$$AF = \frac{a^2}{AE} = \frac{a^2 c}{c^2 - b^2} \text{ und } F = \frac{a^2 b}{c^2 - b^2} P_a.$$

Das von D in b wird in G liegen, wo

$$BG = \frac{b^2}{DB} = \frac{b^2 c}{c^2 - a^2} \text{ und } G = \frac{a b^2}{c^2 - a^2} P_b.$$

Die Bilder der vierten Ordnung werden sein

von G in a am Punkte H , wo

$$AH = \frac{a^2}{AG} = \frac{a^2 (c^2 - a^2)}{c (c^2 - a^2 - b^2)} \text{ und } H = \frac{a^2 b^2}{c (c^2 - a^2 - b^2)} P_b,$$

von F in b am Punkte I , wo

$$BI = \frac{b^2}{FB} = \frac{b^2 (c^2 - b^2)}{c (c^2 - a^2 - b^2)} \text{ und } I = \frac{a^2 b^2}{c (c^2 - a^2 - b^2)} P_a.$$

Wir könnten so weiter gehen mit einer Reihe von Bildern, aber da b klein im Vergleich zu c ist, so werden die Bilder rasch kleiner werden und können nach der vierten Ordnung vernachlässigt werden.

Wenn wir nun setzen:

$$q_{aa} = a + \frac{a^2 b}{c^2 - b^2} + \text{u. s. w.}$$

$$q_{ab} = -\frac{ab}{c} - \frac{a^2 b^2}{c (c^2 - a^2 - b^2)} - \text{u. s. w.}$$

$$q_{bb} = b + \frac{ab^2}{c^2 - b^2} + \dots \text{u. s. w.}$$

so wird die gesamte Ladung auf der Kugel a sein

$$E_a = q_{aa} P_a + q_{ab} P_b$$

und die auf der Kugel b wird sein

$$E_b = q_{ab} P_a + q_{bb} P_b.$$

104. Aus diesen Resultaten können wir die Potentiale der beiden Kugeln berechnen, wenn ihre Ladungen gegeben sind. Wenn wir die Glieder mit b^3 vernachlässigen, so finden wir

$$P_a = \frac{1}{a} E_a + \frac{1}{c} E_b,$$

$$P_b = \frac{1}{c} E_a + \left\{ \frac{1}{b} - \frac{a^3}{c^2 (c^2 - a^2)} \right\} E_b.$$

Die elektrische Energie des Systems ist

$$\frac{1}{2} (E_a P_a + E_b P_b) = \frac{1}{2} \frac{1}{a} E_a^2 + \frac{1}{c} E_a E_b + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{b} - \frac{a^3}{c^2 (c^2 - a^2)} \right\} E_b^2.$$

Die Abstofsung R zwischen den beiden Kugeln wird gemessen durch das Verhältniss, in welchem die Energie sich verändert, wenn c wächst, also

$$R = \frac{E_b}{c^2} \left\{ E_a - E_b \frac{a^3 (2c^2 - a^2)}{c (c^2 - a^2)^2} \right\}.$$

Damit die Kraft eine abstofsende ist, ist es notwendig, dafs die Ladungen der Kugeln von demselben Zeichen sind und dafs

$$E_a \text{ gröfser ist als } E_b \frac{a^3 (2c^2 - a^2)}{c^2 (c^2 - a^2)^2}.$$

Daher ist die Kraft immer eine anziehende,

1. wenn beide Kugeln unisoliert sind;
2. wenn beide Kugeln keine Ladung haben;
3. Wenn die Kugeln fast in Berührung sind, falls ihre Potentiale verschieden sind.

Wenn die Potentiale der beiden Kugeln gleich sind, so ist die Kraft immer eine abstofsende.

106. Man soll die elektrische Kraft an einem Punkte bestimmen, der ganz in der Nähe, aber aufserhalb der Oberfläche einer leitenden, mit der Erde verbundenen Kugelfläche liegt, wenn diese Kraft herrührt von der Anwesenheit eines elektrischen Punktes A aufserhalb der Kugel.

Der elektrische Zustand an allen Punkten aufserhalb der Kugel ist, wie wir gesehen haben, äquivalent demjenigen, der von dem Punkte A zusammen mit seinem Bilde in B herrührt. Wenn e die Ladung des Punktes A (Fig. 23) ist, so ist die von diesem her-

rührende Kraft in P gleich $\frac{e}{AP^2}$ in der Richtung AP . Zerlegen wir diese Kraft nach einer Richtung parallel AC und nach der Richtung des Radius, so werden die Komponenten sein $\frac{e}{AP^3} AC$ in der Richtung parallel AC und $\frac{e}{AP^3} CP$ in der Richtung CP . Die Ladung des Bildes von A in B ist $-e \cdot \frac{CP}{CA}$ und die von dem Bilde herrührende Kraft in P ist $e \cdot \frac{CP}{CA} \cdot \frac{1}{BP^2}$ in der Richtung BP . Zerlegen wir diese Kraft nach denselben Richtungen wie die andere, so sind ihre Komponenten

$$e \frac{CP}{CA} \cdot \frac{CB}{BP^3} \text{ in einer Richtung parallel } CA,$$

$$e \frac{CP^2}{CA \cdot BP^3} \text{ in der Richtung } PC.$$

Wenn a der Radius der Kugel ist, und wenn $CA = f = ma$ und $AP = r$ ist, dann ist $CB = \frac{1}{m} a$ und $BP = \frac{1}{m} r$; und wenn e die Ladung des Punktes A ist, so ist die Ladung seines Bildes in B $-\frac{1}{m} e$.

Die Kraft in P , die zu der Ladung e in A gehört, ist $\frac{e}{r^2}$ in der Richtung AP . Zerlegen wir diese Kraft nach der Richtung des Radius und nach einer Richtung parallel AC , so sind ihre Komponenten

$$\frac{e}{r^2} \cdot \frac{ma}{r} \text{ in der Richtung } AC \text{ und}$$

$$\frac{e}{r^2} \cdot \frac{a}{r} \text{ in der Richtung } CP.$$

Die Kraft in P , die von dem Bilde $-\frac{1}{m} e$ in B herrührt, ist $\frac{1}{m} e \frac{1}{BP^2}$ oder $e \frac{m}{r^2}$ in der Richtung PB . Zerlegen wir diese nach denselben Richtungen wie die andere Kraft, so sind ihre Komponenten

$$e \frac{m}{r^2} \frac{BC}{BP} = \frac{ema}{r^3} \text{ in der Richtung } CA \text{ und}$$

$$e \frac{m}{r^2} \frac{CP}{BP} = \frac{em^2 a}{r^3} \text{ in der Richtung } PC.$$

Die Komponenten in der Richtung parallel AC sind gleich, haben aber entgegengesetzte Richtung. Die resultierende Kraft geht daher in der Richtung des Radius, wodurch das bestätigt wird, was wir bereits bewiesen haben, daß die Kugel eine Fläche gleichen Potentials ist, auf welcher die resultierende Kraft immer senkrecht steht. Die resultierende Kraft hat daher die Richtung PC und ist gleich $\frac{ea}{r^3} (m^2 - 1)$ in der Richtung PC , d. h. nach dem Mittelpunkte der Kugel zu.

Daraus können wir die Oberflächendichtigkeit der Elektrisierung an einem Punkte der Kugel bestimmen; denn nach Coulombs Gesetz ist, wenn σ die Oberflächendichtigkeit ist

$$4\pi\sigma = R,$$

wo R die resultierende Kraft ist, nach außen wirkend gerechnet.

Da in unserem Falle die resultierende Kraft nach innen wirkt, so ist die Oberflächendichtigkeit überall negativ, und es ist

$$\sigma = -\frac{1}{4\pi} \frac{ea}{r^3} (m^2 - 1).$$

Die Oberflächendichtigkeit variiert also umgekehrt wie die dritte Potenz der Entfernung vom induzierenden Punkte A .

106. In dem Falle der zwei Kugeln A und B (Fig. 24), deren Radien a und b , deren Potentiale P_a und P_b sind und deren Mittelpunkte die Entfernung c haben, können wir die Oberflächendichtigkeit in einem Punkte der Kugel A bestimmen, indem wir sie ansehen, als ob sie von der Wirkung einer Ladung aP_a in A herrührt, zusammen mit der von den Punktepaaren B, D und E, F u. s. w., den aufeinander folgenden Paaren von Bildern.

Setzen wir $r = PB$, $r_1 = PE$, $r_2 = PG$ u. s. w., so finden wir

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} P_a \left[\frac{1}{a} + \frac{b}{r_1^3} \frac{\{(c^2 - b^2)^2 - a^2 c^2\}}{a^2 c} + \dots \right] \\ - \frac{1}{4\pi} P_b \left[\frac{b}{a r^3} (c^2 - a^2) + \frac{b^2 c^2}{r_2^3 (c^2 - a^2)} \left\{ \left(\frac{c^2 - a^2 - b^2}{c^2 - a^2} \right)^2 - \frac{a^2}{c^2} \right\} + \dots \right].$$

Nennen wir B den induzierenden und A den induzierten Körper, dann können wir die auf A induzierte Elektrizität als aus zwei Teilen bestehend ansehen, wovon der eine Teil von dem Potential von B , der andere von dem eigenen Potential abhängt.

Der von P_b abhängende Teil wird von einigen Autoren über Elektrizität die induzierte Elektrizität der ersten Art genannt. Wenn A nicht isoliert ist, so bildet sie die ganze Elektrisierung, und wenn P_b positiv ist, ist sie auf jedem Teile der Oberfläche negativ, am größten aber, dem Zahlenwerte nach, an dem Punkte, der am nächsten an B liegt.

Der von P_a herrührende Teil wird die induzierte Elektrizität der zweiten Art genannt. Sie kann nur existieren, wenn A isoliert ist und sie hat überall daselbe Zeichen wie P_a . Wenn A isoliert und ohne Ladung ist, dann müssen die induzierten Elektrizitäten erster und zweiter Art gleich und entgegengesetzt sein. Die Oberflächendichtigkeit ist negativ auf der B am nächsten liegenden Seite, positiv auf der von B entfernten Seite, aber obwohl die gesamten Mengen positiver und negativer Elektrizität gleich sind, ist die negative Elektrizität mehr konzentriert als die positive, sodaß die neutrale Linie, welche die positive von der negativen Elektrizität scheidet, nicht der Aequator der Kugel ist, sondern näher an B liegt.

Die Bedingung dafür, daß positive und negative Elektrizität zusammen auf der Kugel sind, ist die, daß der Wert von σ an den B nächsten und entferntesten Punkten entgegengesetzte Zeichen hat. Wenn a und b klein im Vergleich zu c sind, können wir alle Glieder der Koeffizienten von P_a und P_b nach den ersten vernachlässigen. Die Werte von r liegen zwischen $c + a$ und $c - a$. Wenn daher P_a liegt zwischen $P_b \frac{b(c-a)}{(c+a)^2}$ und $P_b \frac{b(c+a)}{(c-a)^2}$, wird sowohl positive als negative Elektrizität auf A sein, geschieden durch eine neutrale Linie. Wenn aber P_a außerhalb dieser Grenzen liegt, so wird die Elektrizität auf jedem Teile der Fläche von ein und derselben Art sein; negativ, wenn P_a unterhalb der niederen und positiv, wenn P_a oberhalb der höheren Grenze liegt.

Achtes Kapitel.

Über elektrostatische Kapazität.

107. Die Kapazität eines Leiters wird durch diejenige elektrische Ladung gemessen, welche sein Potential auf den Wert 1 bringt, wenn das Potential aller anderen Leiter in dem Felde auf Null gehalten wird. Die Kapazität eines Leiters hängt nicht nur von seiner eigenen Gestalt und Beschaffenheit ab, sondern auch von der Form und Lage der anderen Leiter in dem Felde. Je näher die unisolierten Leiter sind, desto gröfser ist die Kapazität des geladenen Leiters.

Ein aus zwei isolierten Leitern bestehender Apparat, bei dem jeder Leiter dem anderen eine grofse Fläche darbietet und die beide in geringem Abstände voneinander sind, heifst ein Kondensator, weil eine kleine elektromotorische Kraft im Stande ist, einen solchen Apparat mit einer grofsen Menge Elektrizität zu laden.

Die einfachste Form eines Kondensators, bei welcher dieser Name auch gewöhnlich angewendet wird, besteht aus zwei einander parallel gegenüberstehenden Platten, in deren Zwischenraum Luft ist. Wird eine dieser Platten mit der Zinkelektrode, die andere mit der Kupferelektrode einer Volta'schen Batterie verbunden, so werden die Scheiben beziehlich mit negativer und positiver Elektrizität geladen und der Betrag der Ladung ist um so gröfser, je näher die Platten aneinander sind; er ist angenähert umgekehrt proportional dem Abstände zwischen ihnen. Wenn wir also die Platten sehr nahe aneinander bringen, sie mit den Elektroden der Batterie verbinden und dann die Verbindung mit der Batterie wieder aufheben, so haben wir zwei starke Ladungen entgegengesetzter Art isoliert auf den Platten. Wenn wir nun eine von den Platten von den anderen entfernen, so leisten wir Arbeit gegen die elektrische Anziehung, welche die Platten aneinander zieht, und wir können so die Energie des Systems so vergrößern, dafs, obwohl die

ursprüngliche elektromotorische Kraft nur die einer Voltaschen Zelle war, doch jede von den Platten, wenn sie getrennt sind, auf so hohes Potential gebracht werden kann, daß die Goldblättchen eines mit ihr verbundenen Elektrometers einen Ausschlag geben.

Auf diese Weise zeigte Volta, daß die von einer Voltaschen Zelle herrührende Elektrizität von derselben Art, wie die durch Reibung entstehende ist, wobei die Kupferelektrode positiv gegen die Zinkelektrode ist. In diesem Kondensator hängt die Kapazität jeder Platte hauptsächlich ab von dem Abstände zwischen ihr und der anderen Platte, aber sie hängt auch in geringerem Grade von der Natur des elektrischen Feldes auf der Hinterseite der Platte ab.

Es gibt aber andere Formen von Kondensatoren, in welchen einer von den Leitern beinahe oder vollständig von dem anderen eingeschlossen ist. In diesem Falle ist die Kapazität des inneren Leiters beinahe oder ganz unabhängig von allem anderen außer von dem äußeren Leiter. Das ist der Fall bei einer Leydener Flasche und bei einem Kabel, das aus einem inneren Kupferdraht besteht, umgeben von einem Isolator, dessen Außenseite durch eine Hülle von Eisendrähten geschützt ist.

108. Aber in den meisten Fällen hängt die Ladung jedes Leiters nicht nur von der Differenz zwischen seinem Potential und dem des anderen Leiters ab, sondern auch teilweise von der Differenz zwischen seinem Potential und dem eines anderen Körpers, z. B. der Erde, oder der Wände des Raumes, in dem das Experiment gemacht wird. Die Ladungen der beiden Leiter können daher in den einfacheren Fällen geschrieben werden

$$Q = K(P - p) + HP \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$q = K(P - p) + hp, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

wo P und p die Potentiale sind, wenn die der Wände des Raumes Null sind. Q und q sind die Ladungen der beiden Leiter, K ist die Kapazität des Leiters, insofern sie von der gegenseitigen Beziehung der beiden Leiter abhängt, und H und h stellen diejenigen Teile der Kapazität jedes Leiters dar, welche von ihrer Beziehung zu äußeren Objekten, z. B. den Wänden des Raumes, abhängen.

Wenn wir den zweiten Leiter mit der Erde verbinden, so machen wir $p = 0$, während Q daselbe bleibt, und wir erhalten für die neuen Werte von P , Q und q

$$P_1 = P - \frac{K}{K + H}p, \quad Q_1 = (K + H)P_1, \quad q_1 = -KP_1 \quad . \quad (3)$$

Isolieren wir nun den zweiten Leiter und verbinden wir den ersten mit der Erde, so machen wir $P = 0$ und

$$p_2 = -\frac{K}{K + h}P_1, \quad Q_2 = -Kp_2, \quad q_2 = (K + h)p_2 \quad . \quad (4)$$

Isolieren wir nun wieder den ersten Leiter und bringen den zweiten mit der Erde in Verbindung, so ist

$$P_3 = - \frac{K}{K + H} p_2, \quad Q_3 = (K + H) P_3, \quad q_3 = - K P_3. \quad (5)$$

Daraus sieht man, daß, wenn wir erst den ersten und dann den anderen Leiter mit der Erde verbinden, die Werte der Potentiale und Ladungen im Verhältniß von $\frac{K^2}{(K + H)(K + h)}$ zu 1 vermindert werden.

Vergleichung zweier Kondensatoren.

109. Nehmen wir an, die Kondensatoren seien Leydener Flaschen, welche eine innere und eine äußere Belegung haben.

Die innere Belegung der ersten Flasche und die äußere Belegung der zweiten mögen mit einer Elektrizitätsquelle verbunden und auf das Potential P gebracht sein, während die äußere Belegung der ersten und die innere der zweiten mit der Erde in Verbindung sind.

Wenn dann Q_1 und Q_2 die Ladungen der inneren Belegungen der beiden Flaschen sind, dann ist

$$Q_1 = (K_1 + H_1) P, \quad Q_2 = - K_2 P. \quad (6)$$

Nun mögen die äußeren Belegungen der beiden Flaschen mit der Erde und die inneren Belegungen mit einander verbunden sein. Es wird das gemeinschaftliche Potential der inneren Belegungen gesucht.

Hier haben wir

$$p'_1 = p'_2 = 0$$

$$Q_1 + Q'_2 = Q'_1 + Q_2 \quad (7)$$

$$P'_1 = P'_2 = P' \quad (8)$$

und wir haben P' zu finden.

Infolge von (8) wird die Gleichung (7)

$$(K_1 + H_1 - K_2) P = (K_1 + H_1 + K_2 + H_2) P'.$$

Wenn $K_1 + H_1 = K_2$ ist, ist die Entladung vollständig.

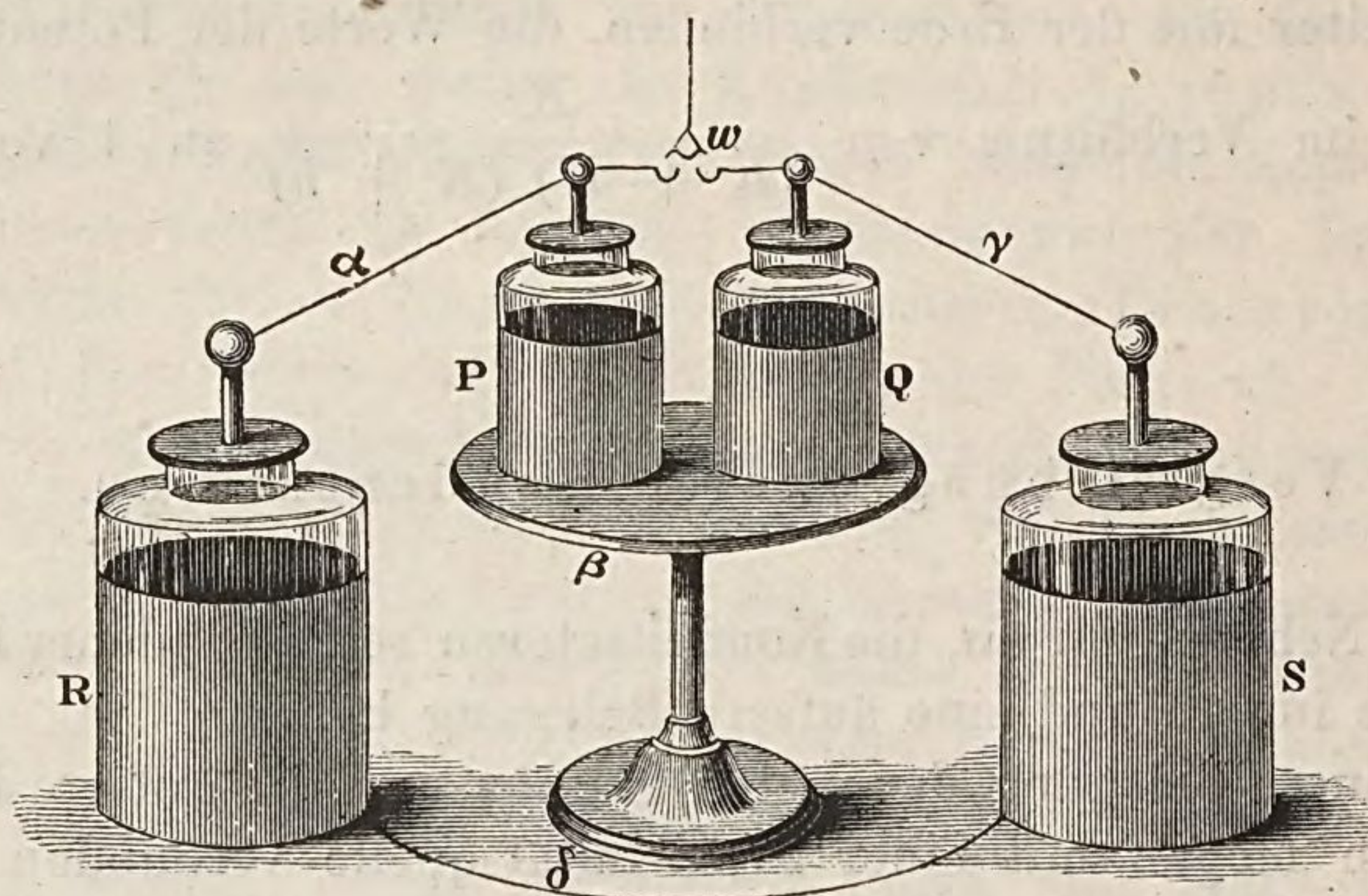
110. Die folgende Methode, durch welche das Vorhandensein einer bestimmten Beziehung zwischen den Kapazitäten von vier Kondensatoren geprüft werden kann, wurde von Sir W. Thomson¹⁾ angewendet. Sie entspricht in der Elektrostatik der Wheatstone'schen Brücke im Galvanismus.

¹⁾ Gibson und Barclay.

Maxwell, Elektrizität etc.

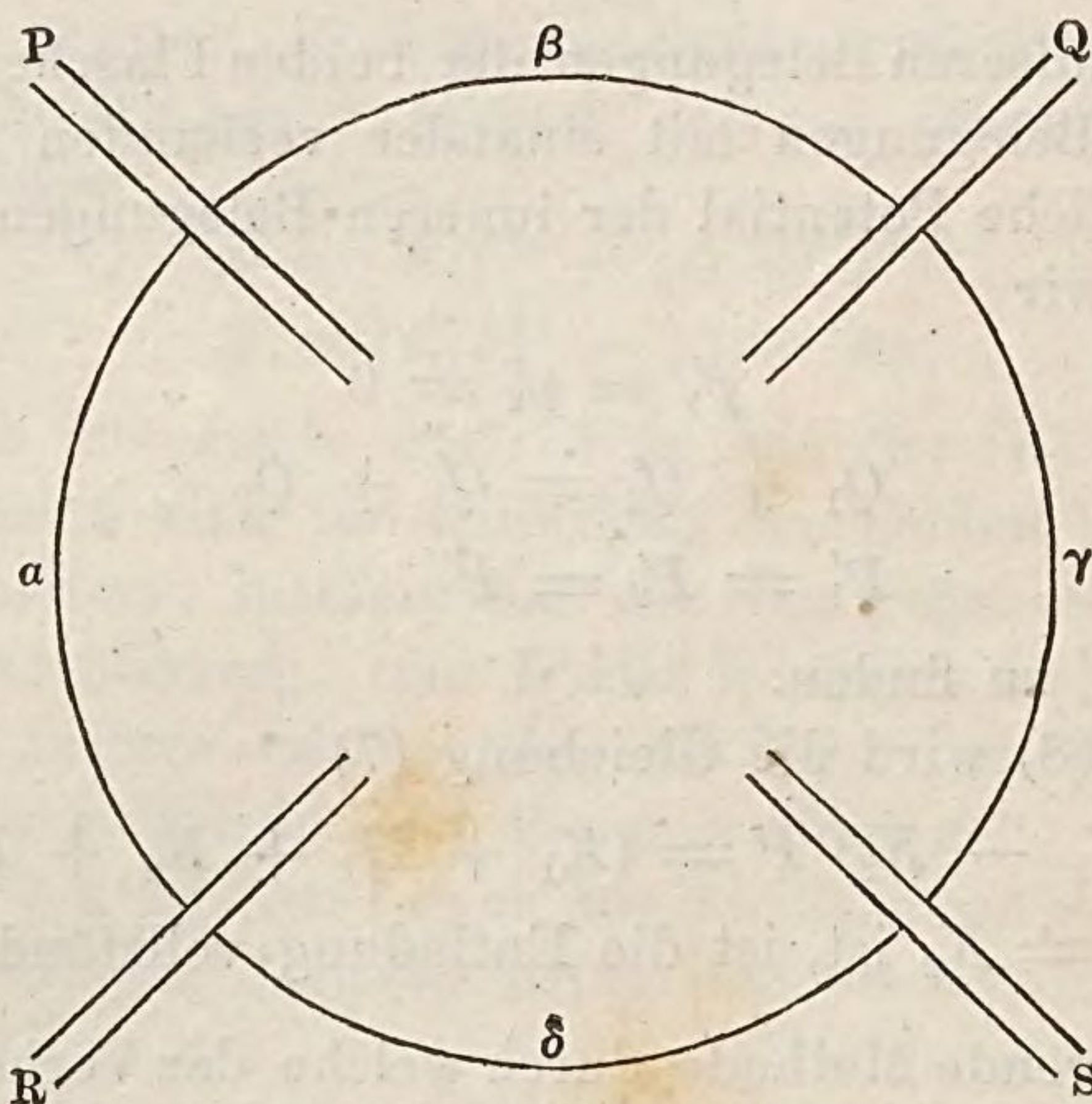
In Fig. 25 sind die Kondensatoren als Leydener Flaschen dargestellt. Zwei von ihnen, P und Q , werden mit ihren äußeren Belegungen in Berührung mit einem isolierten Gestell β gebracht; bei den anderen beiden, R und S , sind die äußeren Belegungen mit der Erde

Fig. 25.



verbunden. Die inneren Belegungen von P und R sind permanent verbunden, ebenso die von Q und S . Um das Experiment auszuführen, werden erst die inneren Belegungen von P und R bis zu einem Po-

Fig. 26.



tential A geladen, während die von Q und S bis zu einem anderen Potential C geladen werden. Während dieses Prozesses ist das Gestell β mit der Erde verbunden. Dann wird die Verbindung des Gestelles β mit der Erde aufgehoben und dasselbe mit einer Elektrode eines Elektrometers verbunden, dessen andere Elektrode zur Erde abgeleitet

ist. Da β durch die Verbindung mit der Erde bereits auf das Potential Null gebracht ist, so wird kein Ausschlag des Elektrometers stattfinden, wenn nicht in einigen Flaschen Undichtigkeiten vorhanden sind. Wir wollen aber annehmen, daß keine undichte Stelle vorhanden ist und daß das Elektrometer auf Null bleibt.

Nun bringt man die inneren Belegungen der vier Flaschen in Verbindung miteinander, indem man den kleinen isolierten Draht w so fallen läßt, daß er in die beiden mit α und γ verbundenen Haken hineinfällt. Da die Potentiale von α und γ verschieden sind, so wird eine Entladung stattfinden und das Potential von β wird im allgemeinen geändert werden und dies wird durch das Elektrometer angezeigt werden. Wenn dagegen eine bestimmte Beziehung zwischen den Kapazitäten der Flaschen vorhanden ist, so wird das Potential von β Null bleiben.

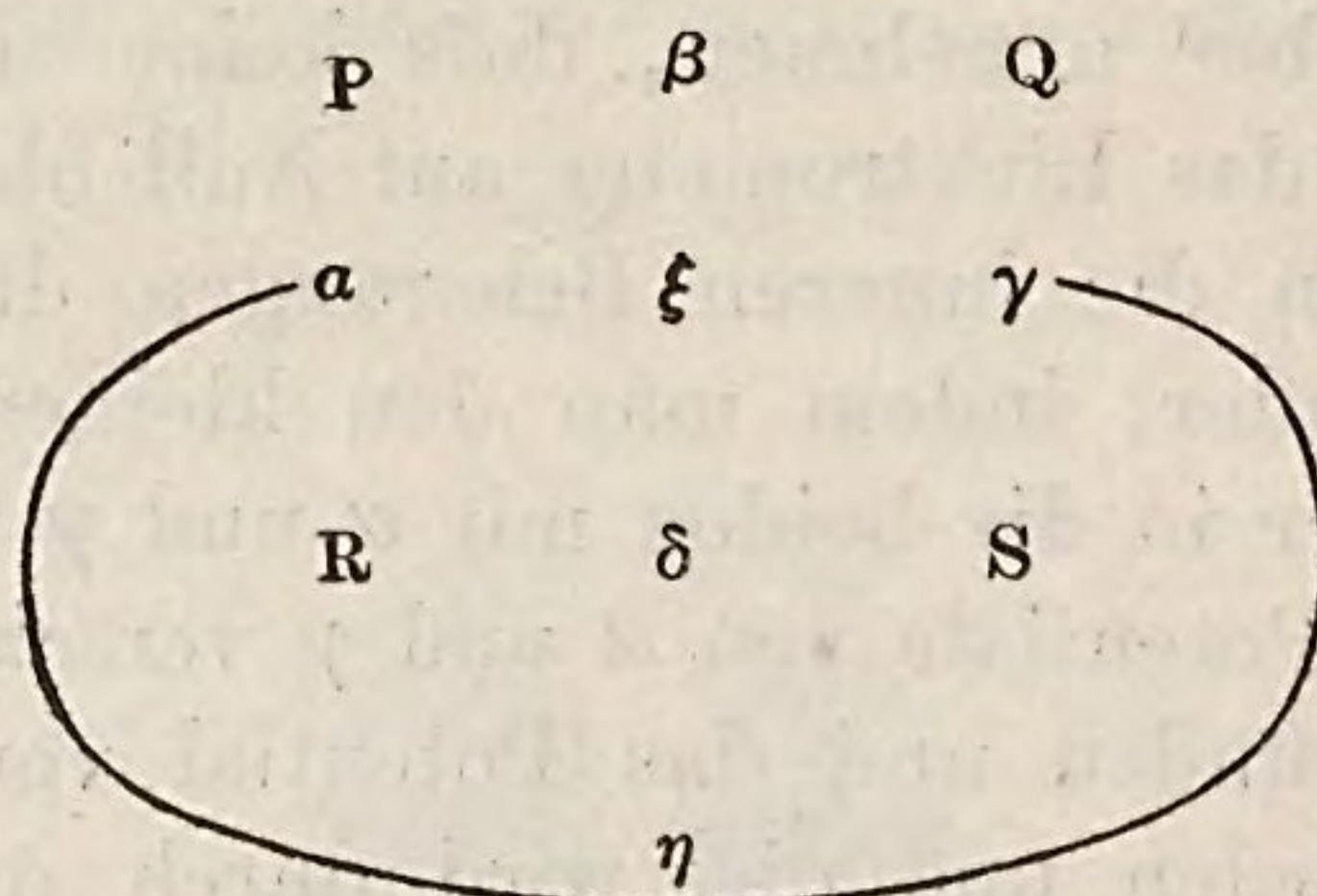
111. Bestimmen wir, welche Beziehung das sein muß. In Fig. 26 ist dasselbe elektrische Arrangement unter einer einfacheren Form dargestellt, indem hier jeder von den Kondensatoren aus einem Paar Platten besteht. In dieser Form ist die Analoge mit der Wheatstone'schen Brücke auch für das Auge deutlich. Wir haben die Potentiale und Ladungen von vier Leitern zu betrachten. Der erste besteht aus den inneren Belegungen von P und R und dem Verbindungsdrahte α zwischen ihnen. Wir wollen diesen Leiter α , seine Ladung a , sein Potential A nennen. Der zweite Leiter besteht aus den äußeren Belegungen von P und Q zusammen mit dem isolierenden Gestell β . Wir wollen diesen Leiter β , seine Ladung b , sein Potential B nennen. Der dritte Leiter besteht aus den inneren Belegungen von Q und S und dem Verbindungsdrahte γ . Wir wollen diesen Leiter γ , seine Ladung c , sein Potential C nennen. Endlich der vierte Leiter besteht aus den äußeren Belegungen von R und S und aus der Erde, mit welcher sie in Verbindung gehalten sind. Wir könnten die Buchstaben δ , d und D in Bezug auf diesen Leiter brauchen, aber da sein Potential immer Null und seine Ladung immer gleich und entgegengesetzt ist der der anderen Leiter, so werden wir sie nicht zu betrachten brauchen.

Die Ladung jedes einzelnen von diesen Leitern hängt von seinem eigenen Potential und zugleich von den Potentialen der beiden benachbarten Leiter ab, und auch, aber in sehr geringem Grade, von der des gegenüberliegenden Leiters.

Es seien die Koeffizienten der Induktion zwischen den verschiedenen Paaren der vier Leiter die in dem folgenden Schema angegebenen (s. Fig. 27 a. f. S.), wo ξ und η im Vergleich zu P , Q , R , S sehr klein sind. Der Kapazitätskoeffizient eines jeden der Leiter wird größer sein als die Summe seiner drei Induktionskoeffizienten und zwar um eine Größe, welche klein sein wird, wenn die Kapazität der Knöpfe der

Flaschen und ihrer Verbindungsdrähte alle klein sind im Vergleich zu den ganzen Kapazitäten der Flaschen. Bezeichnen wir diesen Über-

Fig. 27.



schufs für die einzelnen Leiter beziehlich durch die Symbole α , β , γ , δ . Die Kapazitäten werden daher sein

$$P + R + \alpha + \eta,$$

$$P + Q + \beta + \xi,$$

$$Q + S + \gamma + \eta,$$

$$R + S + \delta + \xi,$$

und daher werden die Ladungen sein

$$\text{für } \alpha \quad a = (P + R + \alpha + \eta) A - PB - RD - \eta C$$

$$\text{für } \beta \quad b = (P + Q + \beta + \xi) B - PA - QC - \xi D$$

$$\text{für } \gamma \quad c = (Q + S + \gamma + \eta) C - QB - SD - \eta A$$

$$\text{für } \delta \quad d = (R + S + \delta + \xi) D - RA - SC - \xi B$$

In dem ersten Teile des Experiments sind die Potentiale von α und γ beziehlich A und C , während die von β und δ Null sind. Daher ist zuerst

$$a = (P + R + \alpha + \eta) A - \eta C$$

$$b = -PA - QC$$

$$c = (Q + S + \gamma + \eta) C - \eta A$$

Die Ladung von δ brauchen wir nicht zu bestimmen.

Nun werde eine Verbindung zwischen α und γ gemacht. Wir wollen die Ladungen und Potentiale der Leiter nach der Entladung mit accentuierten Buchstaben bezeichnen; ihr gemeinsames Potential wollen wir y nennen, dann ist

$$A' = C' = y.$$

Die Summe ihrer Ladungen bleibt dieselbe, also

$$a' + c' = a + c.$$

Die Ladung von β bleibt dieselbe wie früher, also

$$b' = b,$$

aber sein Potential ist nicht mehr Null, sondern B' , und wir haben den Werth von B' durch A und C auszudrücken, indem wir die anderen Gröfsen, die in die Gleichungen eingehen, eliminieren.

Nach der Entladung ist

$$a' = (P + R + \alpha) y - PB'$$

$$b' = (P + Q + \beta + \xi) B' - (P + Q) y,$$

$$c' = (Q + S + \gamma) y - QB'.$$

Die Gleichung $a' + c' = a + c$ wird daher

$$(P + R + Q + S + \alpha + \gamma) y - (P + Q) B' = (P + R + \alpha) A + (Q + S + \gamma) C$$

und die Gleichung $b' = b$ wird

$$(P + Q + \beta + \xi) B' - (P + Q) y = -PA - QC.$$

Eliminieren wir aus diesen Gleichungen y , so finden wir

$$B' \{ (P + Q) (R + S) + (P + Q) (\alpha + \beta + \gamma + \xi) + (R + S + \alpha + \gamma) (\beta + \xi) \} \\ = \{ Q(R + \alpha) - P(S + \gamma) \} (A - C).$$

Wenn daher das Elektrometer durch die Entladung nicht beeinflusst wird, so ist $B' = 0$ und

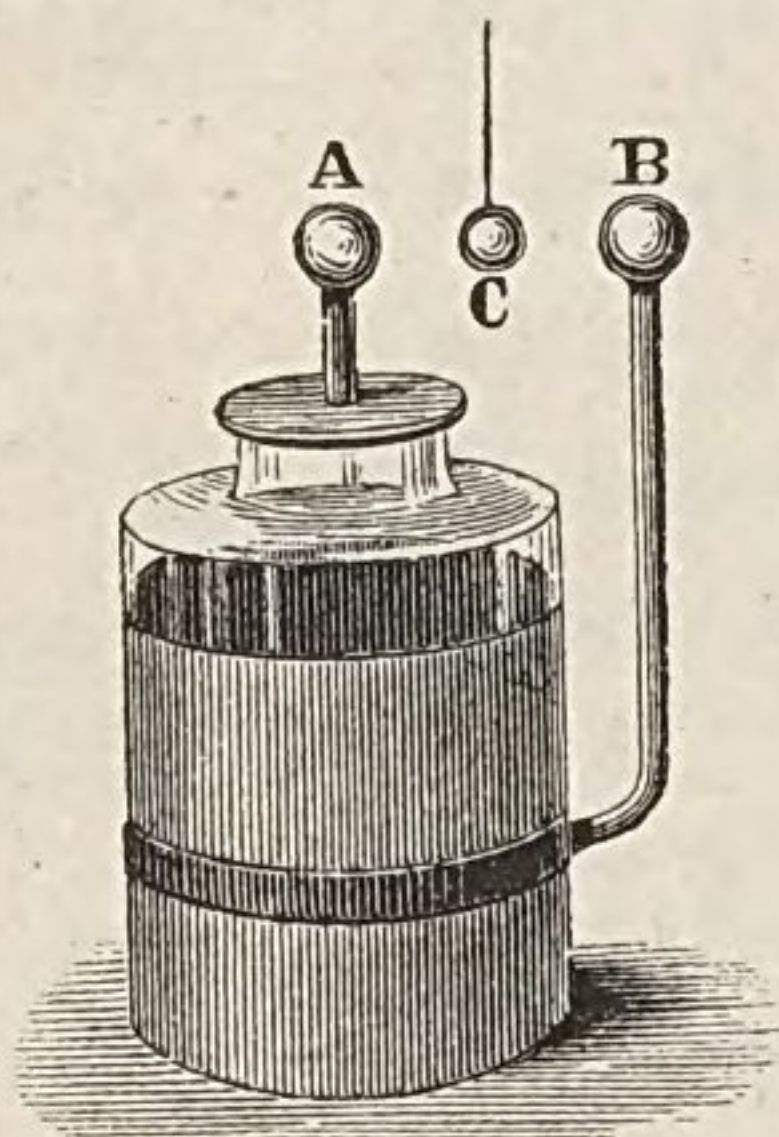
$$P : Q = R + \alpha : S + \gamma.$$

Neuntes Kapitel.

Der elektrische Strom.

112. Es seien *A* und *B* zwei metallische Körper, die beziehlich mit der inneren und der äußeren Belegung einer Leydener Flasche verbunden seien. Die innere Belegung der Flasche sei positiv, so daß das Potential in *A* höher ist als das in *B*.

Fig. 28.



Es sei *C* ein vergoldetes Markkugelchen, das an einem Seidenfaden aufgehängt sei. Wenn *C* abwechselnd mit *A* und *B* in Berührung gebracht wird, wird es jedesmal, wenn es *A* berührt, eine kleine Ladung positiver Elektrizität von *A* erhalten und wird positive Elektrizität an *B* abgeben, wenn es dieses berührt.

Es wird so eine Übertragung positiver Elektrizität von *A* nach *B* auf dem Wege stattfinden, den das Markkugelchen durchläuft und gerade das ist es, was in jedem elektrischen Strome vor sich geht, nämlich der Übergang von Elektrizität längs einer bestimmten Richtung. Das Kugelchen ist während seiner Bewegung von *A* nach *B* positiv geladen und die elektrische Kraft zwischen *A* und *B* strebt es in der Richtung von *A* nach *B* zu bewegen. Nachdem es *B* berührt hat, wird es negativ geladen, so daß die elektrische Kraft, während es seinen Rückweg macht, von *B* nach *A* wirkt. Auf die Kugel wirkt also die elektrische Kraft immer in der Richtung, nach welcher sie sich gerade bewegt, so daß, wenn die Kugel passend aufgehängt ist, die elektrische Kraft nicht nur die Vorwärts- und Rückwärtsbewegung aufrecht halten wird, sondern der sich bewegendem Kugel auch noch einen Betrag von Energie mitteilen wird,

welche sie in einer Reihe von hörbaren Stößen gegen die Kugeln *A* und *B* aufwenden wird. Der Strom positiver Elektrizität von *A* nach *B* wird so durch die elektromotorische Kraft von *A* nach *B* beständig erhalten.

113. Die Erscheinung, die wir eben beschrieben haben, kann man einen Konvektionsstrom nennen. Die Bewegung der Elektrizität findet statt infolge der Bewegung des elektrischen Körpers, welcher die Elektrizität mit sich führt, wenn er sich von einer Stelle nach einer anderen bewegt. Wenn wir aber statt des Markkugelchens einen Metalldraht nehmen, den wir an einer isolierten Handhabe fassen und wenn wir es einrichten, daß die beiden Enden des Drahtes beziehlich *A* und *B* berühren, so wird längs des Drahtes eine Übertragung der Elektrizität von *A* nach *B* stattfinden, obwohl der Draht sich nicht selbst bewegt.

Den Vorgang in dem Drahte nennt man einen Leitungsstrom. Der Effekt des Leitungsstromes auf den elektrischen Zustand von *A* und *B* ist von genau derselben Art, wie der des Konvektionsstromes. In beiden Fällen findet ein Übergang von Elektrizität von einer Stelle zu einer anderen auf einem kontinuierlichen Wege statt.

In dem Falle, daß die Ladung auf dem Markkugelchen übergeführt wird, können wir die wirkliche Bewegung des Kugelchens beobachten, und wir können daher in diesem Falle die beiden Vorgänge unterscheiden, daß einmal positive Ladung von *A* nach *B* geschafft wird und daß das andere Mal negative Ladung von *B* nach *A* geschafft wird, obwohl die elektrischen Effekte dieser beiden Operationen identisch sind. Wir können auch unterscheiden zwischen dem Vorgange, daß eine Anzahl von kleinen Ladungen von *A* nach *B* in rascher Aufeinanderfolge und mit großer Geschwindigkeit geschafft wird und dem Vorgange, daß eine einzige große Ladung, die gleich der Summe dieser Ladungen ist, langsam von *A* nach *B* geschafft wird in der Zeit, die durch die ganze Reihe der Hin- und Rückgänge in dem anderen Falle ausgefüllt wird.

Aber in dem Falle eines Leitungsstromes durch einen Draht haben wir ebensoviel und ebensowenig Recht anzunehmen, daß die Art und Weise der Übertragung der einen oder der anderen von diesen Methoden ähnlich ist. Was wir wissen, ist nur, daß eine Ladung von so und so viel Elektrizität in einer gewissen Zeit von *A* nach *B* geschafft wird, aber ob das dadurch geschieht, daß positive Elektrizität von *A* nach *B* geschafft wird, oder dadurch, daß negative von *B* nach *A* geschafft wird, oder ob das durch eine Kombination von beiden Prozessen geschieht, das ist eine Frage, zu deren Beantwortung wir keine Mittel haben. Ebenso sind wir nicht im Stande zu bestimmen, ob die „Geschwindigkeit der Elektrizität“ in dem Drahte groß oder klein ist. Wenn es eine die Körper durchdringende Substanz ist, deren Bewegung

einen elektrischen Strom bildet, dann bildet der Überschuss dieser Substanz in einem Körper über einen gewissen normalen Wert die beobachtete Ladung dieses Körpers und das ist eine der Messung zugängliche Gröfse. Wir haben aber kein Mittel, um die normale Ladung selbst zu schätzen. Die einzige Gewifsheit, die wir besitzen, rührt von Experimenten über die Menge der durch die Zersetzung von einem Gramm eines Elektrolyten entwickelten Elektrizität her und diese Menge ist ungeheuer grofs im Vergleich zu der positiven oder negativen Ladung, welche wir in dem von dem Elektrolyten eingenommenen Raume anhäufen können. Wenn also die normale Ladung eines Teiles des Drahtes, dessen Länge ein Milliontel Zentimeter ist, gleich der gesamten von *A* nach *B* übertragenen Ladung ist, so kann diese Übertragung durch eine Verschiebung der Elektrizität in dem Drahte stattfinden, deren lineare Gröfse nur ein Milliontel Zentimeter ist.

Es ist daher wohl möglich, dafs die Geschwindigkeit der Elektrizität in einem Telegraphendrahte aufserordentlich klein ist, kleiner z. B. als der hundertste Teil eines Zentimeters in einer Stunde, obwohl Signale, d. h. Änderungen in dem Zustande des Stromes, viele Tausend Meilen weit in einer Sekunde durch den Draht fortgepflanzt werden können.

Da wir daher über die wahre, lineare Geschwindigkeit eines elektrischen Stromes in Unkenntnis sind, so müssen wir die Stärke des Stromes durch diejenige Menge von Elektrizität messen, welche durch irgend einen Querschnitt des Leiters in der Zeiteinheit hindurch fließt, ebenso wie Ingenieure den Ausfluß von Wasser und Gas durch Röhren nicht durch die Geschwindigkeit des Wassers oder Gases messen, sondern durch die Menge, welche in einer Sekunde ausfließt.

114. In vielen Fällen haben wir die gesamte übergehende Elektrizitätsmenge zu betrachten, nicht die Stärke, in welcher sie übergeht. Dies ist besonders der Fall, wenn der Strom nur eine sehr kurze Zeit dauert, oder wenn der Strom nur als der Übergang von einem permanenten Zustande des Systems zu einem anderen betrachtet wird. In diesen Fällen ist es zweckmäfsig, von dem gesamten Strome als von der elektrischen Verschiebung zu sprechen, wo das Wort Verschiebung das Endresultat einer Bewegung angibt, ohne Beziehung auf das zeitliche Verhältniß, in welchem sie stattfindet. Der Übergang einer gegebenen Menge von Elektrizität auf einem gegebenen Wege wird eine elektrische Entladung genannt.

Klassifikation der Körper nach ihrem Verhalten in Bezug auf die Übertragung der Elektrizität.

115. Zum Zweck einer Unterscheidung wollen wir einen Teil irgend eines Stoffes betrachten, dessen Ende durch zwei Niveauflächen mit verschiedenen Potentialen gebildet werden, und dessen Seiten durch elektrische Stromlinien oder Verschiebungslinien gebildet werden.

Die Enden des Körpers werden seine Elektroden genannt, diejenige Elektrode, in welcher die Elektrizität eintritt, wird Anode, diejenige, in welcher sie aus dem Körper austritt, Kathode genannt.

Der Überschuss des Potentials der Anode über das der Kathode wird die äussere elektromotorische Kraft genannt.

Die Form des Körpers kann variieren von der eines langen mit Luft oder einem anderen isolierenden Medium umgebenen Drahtes bis zu der einer dünnen Platte aus der Substanz, bei welcher die Elektrizität in Richtung ihrer Dicke hindurchgeht.

Die Körper können in drei grosse Klassen eingeteilt werden, je nach der Art und Weise, wie eine elektromotorische Kraft auf sie wirkt: Metalle, Elektrolyte, Dielektrika.

Erste Klasse: Metalle u. s. w.

16. Die erste Klasse enthält sämtliche Metalle, sowohl im festen als im flüssigen Zustande; zugleich auch noch einige andere Substanzen, die von den Chemikern nicht als Metalle angesehen werden. Bei diesen Körpern ist die geringste elektromotorische Kraft im Stande, einen elektrischen Strom hervorzubringen und dieser Strom fliesst so lange, als die elektromotorische Kraft zu wirken fortfährt, ohne dass er irgend welche Veränderung in den chemischen Eigenschaften der Substanz hervorbringt. Die Stärke des permanenten Stromes ist proportional der elektromotorischen Kraft. Das Verhältnis des numerischen Wertes der elektromotorischen Kraft zu dem der Stromstärke wird der Widerstand des Leiters genannt. Man kann dasselbe auch noch auf andere Weise ausdrücken, indem man sagt, dass sich dem Strome eine innere elektromotorische Kraft entgegensetzt, die proportional der Stärke des Stromes und einer Grösse ist, welche man den Widerstand des Leiters nennt und welche von seiner Form und Beschaffenheit abhängt. Wenn die Stärke des Stromes derart ist, dass diese innere elektromotorische Kraft der äusseren elektromotorischen Kraft das Gleichgewicht hält,

so ändert sich die Stärke des Stromes nicht mehr, sie nimmt weder zu noch ab. Man sagt dann, daß der Strom ein stationärer ist.

Diese Beziehungen wurden zuerst von Dr. G. S. Ohm in einem Werke vom Jahre 1827 aufgestellt. Sie werden ausgedrückt durch die Formel

Elektromotorische Kraft $=$ Stromstärke $\times$ Widerstand,
welche man das Ohm'sche Gesetz nennt.

Erzeugung von Wärme durch den Strom.

Während ein stationärer Strom durch einen Leiter erster Klasse von homogener Beschaffenheit fließt, wird in dem Leiter Wärme erzeugt, aber die Substanz des Leiters wird durchaus nicht affiziert werden; denn wenn man die Wärme ebenso schnell fortnimmt als sie erzeugt wird, so bleibt die Temperatur und jeder andere physikalische Zustand des Leiters derselbe.

Die gesamte, von der äußeren elektromotorischen Kraft geleistete Arbeit, um Elektrizität durch den Körper zu treiben, wird daher dazu verwendet, um Wärme zu erzeugen. Das dynamische Äquivalent der erzeugten Wärme ist daher gleich der aufgewendeten elektrischen Arbeit, d. h. gleich dem Produkt der elektromotorischen Kraft in die von dem Strome übergeführte Elektrizitätsmenge.

Nun ist die elektromotorische Kraft nach dem Ohmschen Gesetze das Produkt aus der Stärke des Stromes in den Widerstand und die Elektrizitätsmenge ist, nach der Definition eines Stromes, das Produkt aus der Stromstärke und der Zeit, während welcher der Strom fließt, so daß wir finden:

Die erzeugte Wärme, gemessen in dynamischen Einheiten
 $=$ Quadrat der Stromstärke $\times$ Widerstand $\times$ Zeit.

Diese Beziehung wurde zuerst von Dr. Joule aufgestellt und heißt deshalb das Joulesche Gesetz. Sie wurde auch unabhängig von Lenz aufgestellt.

Zweite Klasse: Elektrolyte.

118. Die zweite Klasse der Stoffe besteht aus zusammengesetzten Körpern, im allgemeinen in flüssiger Form. Man nennt sie Elektrolyte.

Wenn ein elektrischer Strom durch geschmolzenes Silberchlorid, welches ein Elektrolyt ist, hindurchgeht, so erscheint Chlorgas an der Anode, wo der Strom eintritt, und Silber an der Kathode, wo der Strom aus dem Elektrolyten austritt. Das Mengenverhältnis dieser

beiden Substanzen ist ein solches, daß sie verbunden wieder Chlorsilber bilden würden. Die Zusammensetzung derjenigen Teile der Elektrolyten, welche zwischen den Elektroden liegen, bleibt ungeändert. Wenn wir daher unsere Aufmerksamkeit auf einen Teil des Elektrolyten richten, der zwischen zwei festen, senkrecht zu der Richtung des Stromes stehenden Ebenen liegt, so muß die Menge von Silber oder von Chlor, welche durch die eine Ebene in diesen Teil eintritt, gleich sein der Menge, welche durch die andere Ebene aus ihm austritt. Daraus folgt, daß in jedem Teile des Elektrolyten das Silber sich in der Richtung des Stromes bewegt und das Chlor in der entgegengesetzten Richtung.

Diese Operation, bei welcher ein zusammengesetzter Körper durch den elektrischen Strom zersetzt wird, wird Elektrolyse genannt und die Art und Weise, wie der Strom hindurchgeht, wird elektrolytische Leitung genannt. Den zusammengesetzten Körper nennt man einen Elektrolyten und die Komponenten, in welche er zerlegt wird, Ionen. Dasjenige Ion, welches an der Anode erscheint, heißt Anion, und das, welches an der Kathode erscheint, Kation.

Die Menge der Substanz, welche zerlegt wird, ist proportional der gesamten Menge der Elektrizität, welche durch sie hindurchgeht, und ist unabhängig von der Zeit, während welcher die Elektrizität hindurchgeht. Die Menge der Substanz, welche dem Durchgange einer Einheit der Elektrizität entspricht, wird das elektrochemische Äquivalent der Substanz genannt. Wenn z. B. eine Einheit von Elektrizität durch geschmolzenes Chlorsilber geht, so erscheint ein elektrochemisches Äquivalent von Silber an der Kathode und ein elektrochemisches Äquivalent von Chlor an der Anode und ein elektrochemisches Äquivalent von Silberchlorid verschwindet.

119. Die elektrochemischen Äquivalente ein und derselben Substanz, wenn sie aus Experimenten mit verschiedenen Elektrolyten, die sie enthalten, abgeleitet werden, stimmen miteinander überein. So ist das elektrochemische Äquivalent von Chlor daselbe, ob wir es aus Experimenten mit Silberchlorid ableiten oder aus Experimenten mit Chlorwasserstoffsäure, und das von Silber ist daselbe, ob wir es aus Experimenten mit Silberchlorid oder aus Experimenten mit Silbernitrat entnehmen. Die Gesetze der Elektrolyse wurden von Faraday¹⁾ aufgestellt. Wenn sie genau richtig sind, so ist die Leitung der Elektrizität durch einen Elektrolyten immer eine elektrolytische Leitung, d. h. der elektrische Strom ist immer verbunden mit einer Bewegung der Komponenten des Elektrolyten nach entgegengesetzten Richtungen.

¹⁾ Exp. Res. Reihe VII u. VIII.

Eine solche Bewegung der Komponenten bedingt notwendig ihr Erscheinen in getrennter Form an der Anode und der Kathode. Um diese Trennung zu bewirken, dazu ist eine gewisse elektromotorische Kraft nötig, die von der Verbindungsenergie des Elektrolyten abhängt. So ist z. B. die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes nicht hinreichend, um verdünnte Schwefelsäure zu zersetzen.

Wenn daher eine Zersetzungszone, die aus einem Gefäß mit angesäuertem Wasser besteht, in welches zwei Platinplatten als Elektroden tauchen, in den Stromkreis eines einzigen Daniellschen Elements eingeschaltet wird und zugleich ein Galvanometer eingefügt wird, um den Strom zu messen, so wird man finden, daß, obwohl im Moment, wo der Stromkreis geschlossen wird, ein Strom durchgeht, doch dieser Strom an Intensität rasch abnimmt, so daß er in sehr kurzer Zeit zu schwach wird, um gemessen werden zu können, außer wenn das Galvanometer sehr empfindlich ist.

Weder Sauerstoff noch Wasserstoff, die chemischen Komponenten des Wassers, erscheinen in Gasform an den Elektroden, aber die Elektroden selbst erhalten neue Eigenschaften zum Beweise, daß eine chemische Aktion an der Oberfläche der Platinplatten stattgefunden hat.

120. Wenn das Daniellsche Element aus dem Stromkreise ausgeschaltet wird und der Kreis wieder geschlossen wird, so zeigt das Galvanometer einen Strom an, der durch die Zersetzungszone in der entgegengesetzten Richtung geht als der ursprüngliche Strom. Dieser Strom nimmt sehr rasch an Stärke ab und verschwindet bald, so daß die gesamte Elektrizitätsmenge, welche er hindurchführt, nie größer ist, als die des ursprünglichen Stromes. Dieser Gegenstrom zeigt an, daß die Platinplatten eine Verschiedenheit ihrer Eigenschaften dadurch erlangt haben, daß sie als Elektroden benutzt wurden. Man sagt, sie seien polarisiert. Die Kathode ist positiv polarisiert und die Anode negativ, so daß sich in dem Stromkreise eine elektromotorische Kraft zeigt, die der des Daniellschen Elements entgegengesetzt ist. Diese elektromotorische Kraft, welche die elektromotorische Kraft der Polarisation genannt wird, ist die Ursache dafür, daß die Stärke des ursprünglichen Stromes rasch abnimmt und er schließlich verschwindet.

Eine chemische Prüfung der Platinplatten zeigt, daß eine gewisse Menge von Wasserstoff auf der Kathode abgelagert ist. Dieser Wasserstoff ist nicht in der gewöhnlichen Gasform, sondern er hängt so fest an der Oberfläche des Platins, daß es nicht leicht ist, die letzten Spuren von ihm zu entfernen.

121. Faradays Gesetz, daß Leitung in Elektrolyten nur durch Elektrolyse stattfindet, wurde lange als nicht genau richtig angesehen. Bei dem Experiment, in welche mein einzelnes Daniellsches Element die elektromotorische Kraft in einem Stromkreise liefert, der einen Elek-

trolyten und ein Galvanometer enthält, findet man, daß der Strom zwar bald sehr schwach wird, aber niemals ganz aufhört, so daß, wenn die elektromotorische Kraft lange genug wirkt, eine sehr beträchtliche Menge von Elektrizität durch den Elektrolyten ohne eine sichtbare Zersetzung hindurchgehen kann.

Daraus wurde geschlossen, daß Elektrolyte die Elektrizität auf zwei verschiedene Weisen leiten, durch Elektrolyse in sehr starkem Grade und auch, aber in sehr schwachem Grade, nach Art von Metallen ohne Zersetzung. Aber Helmholtz ¹⁾ hat vor Kurzem gezeigt, daß der schwache, permanente Strom auf andere Weise erklärt werden kann und daß wir keinen Beweis dafür haben, daß ein Elektrolyt die Elektrizität ohne Elektrolyse leiten kann.

122. In dem Falle, daß wir Platinplatten in verdünnte Schwefelsäure tauchen, dauert, wenn die Flüssigkeit sorgfältig von allen Spuren von gelöstem Sauerstoff oder Wasserstoff befreit ist, und wenn ebenso die Oberflächen der Platinplatten von anhaftendem Sauerstoff oder Wasserstoff befreit sind, der Strom nur so lange, bis die Platinplatten polarisiert sind, und ein permanenter Strom kann nicht mehr entdeckt werden, selbst nicht mit einem empfindlichen Galvanometer. Wenn das Experiment ohne diese Vorsichtsmaßregeln angestellt wird, so ist im allgemeinen eine gewisse Menge von gelöstem Sauerstoff oder Wasserstoff in der Lösung, und diese verbinden sich, wenn sie mit dem an der Platinoberfläche anhaftenden Wasserstoff oder Sauerstoff in Berührung kommen, langsam mit diesem, gerade wie es die freien Gase in Gegenwart des Platins thun. So verringert sich die Polarisation, und die elektromotorische Kraft ist infolgedessen im Stande, einen Strom permanent zu erhalten und zwar durch die von Helmholtz sogenannte elektrolytische Konvektion. Außerdem ist es noch wahrscheinlich, daß die molekulare Bewegung der Flüssigkeit im Stande ist, zufällig Moleküle von Sauerstoff oder Wasserstoff, die an den Platinplatten haften, abzureißen und fortzubewegen. Diese Moleküle werden von der Flüssigkeit absorbiert und wandern nach den gewöhnlichen Diffusionsgesetzen, denn nur, wenn sie in chemischer Verbindung sind, werden ihre Bewegungen von der elektromotorischen Kraft geleitet. Sie werden daher gleichmäßig durch die Flüssigkeit zu diffundieren suchen und werden daher in einiger Zeit die andere Elektrode erreichen, wo sie in Berührung mit einer Platinfläche sich miteinander verbinden und einen Teil des anderen Bestandtheiles, der an dieser Fläche haftet, neutralisieren. Auf diese Weise wird ein beständiger Kreislauf erhalten, indem jeder von den Bestandteilen durch Elektrolyse nach der einen Richtung wandert und durch Diffusion

¹⁾ Über galvanische Polarisation in gasfreien Flüssigkeiten. Monatsber. der k. Akademie in Berlin, Juli 1873, p. 587.

wieder zurückkehrt, so daß ein permanenter Strom bestehen kann ohne eine sichtbare Anhäufung der Zersetzungsprodukte. Wir können daher schließen, daß die vermutete Ungenauigkeit von Faradys Gesetz noch nicht experimentell bestätigt worden ist.

123. Die Prüfung des Ohmschen Gesetzes in seiner Anwendung auf elektrolytische Leitung ist mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden, weil die veränderliche Polarisirung der Elektroden eine variable elektromotorische Kraft einführt und es schwierig macht, die wahre elektromotorische Kraft in einem Augenblick zu bestimmen. Wenn man Elektroden in der Form von Platten anwendet, die eine gegen den Querschnitt des Elektrolyten große Fläche haben und wenn man nach entgegengesetzten Richtungen wechselnde Ströme benutzt, so kann die Wirkung der Polarisirung gegenüber der des wirklichen Widerstandes verringert werden. Aus Experimenten, die in dieser Weise angestellt sind, ergibt sich, daß das Ohmsche Gesetz für Elektrolyte ebenso wie für Metalle richtig ist, das heißt, daß die Stromstärke immer proportional der elektromotorischen Kraft ist, welches auch die Größe dieser Kraft ist. Die Ursache, daß der äußere Widerstand eines Elektrolyten größer für kleine als für große elektromotorische Kräfte erscheint, ist die, daß die äußere elektromotorische Kraft zwischen den metallischen Elektroden nicht die wahre elektromotorische Kraft ist, welche auf den Elektrolyten wirkt. Es ist im allgemeinen noch eine elektromotorische Kraft der Polarisirung vorhanden, welche nach der entgegengesetzten Richtung wirkt, wie die äußere elektromotorische Kraft und nur der Überschuss der äußeren Kraft über die Kraft der Polarisirung ist es, welche wirklich auf den Elektrolyten wirkt.

Es ergibt sich daher, daß die kleinste elektromotorische Kraft, wenn sie wirklich auf den Elektrolyten wirkt, im Stande ist, Leitung durch Elektrolyse hervorzubringen. Wie ist das nun in Einklang zu bringen mit der Thatsache, daß, um vollständige Zersetzung zu bewirken, eine sehr beträchtliche elektromotorische Kraft nötig ist?

124. Clausius¹⁾ hat auseinandergesetzt, daß nach der alten Theorie der Elektrolyse, nach welcher der elektromotorischen Kraft nur die Wirkung zugeschrieben wurde, daß sie die Komponenten der Moleküle der Elektrolyten auseinander reißt, daß nach dieser Theorie keine Zersetzung und kein Strom auftreten dürfte, so lange die elektromotorische Kraft unter einem gewissen Werte ist, daß aber, sobald sie diesen Wert erreicht hat, eine lebhafte Zersetzung anfangen müßte, begleitet von einem starken Strome. Dies aber ist durchaus nicht der Fall, sondern der Strom ist genau proportional der elektromotorischen Kraft für alle Werte dieser Kraft.

Clausius erklärt dies auf folgende Weise:

¹⁾ Pogg. Ann. CI, 338, 1857.

Nach der Theorie der molekularen Bewegungen, deren Hauptbegründer er selbst war, bewegt sich jedes Molekül in einer außerordentlich unregelmässigen Weise, indem es durch die Stöße der anderen Moleküle, welche auch in einem Zustande lebhafter Bewegung sind, bald nach der einen, bald nach der anderen Seite getrieben wird.

Diese Molekularbewegung geht immerfort vor sich, unabhängig von der Wirkung der elektromotorischen Kraft. Die Diffusion einer Flüssigkeit durch eine andere wird durch diese molekulare Bewegung bewerkstelligt, welche an Geschwindigkeit zunimmt, wenn die Temperatur wächst. Da die Bewegung außerordentlich unregelmässig ist, so geschehen die Zusammenstöße der Moleküle mit verschiedener Heftigkeit und es ist wahrscheinlich, dass auch bei niedriger Temperatur manche von den Stößen so heftig sind, dass das eine oder beide von den zusammengesetzten Molekülen, die sich getroffen haben, in ihre Konstituenten gespalten werden. Jedes von diesen konstituierenden Atomen stößt dann unter den übrigen Molekülen herum, bis es ein anderes Atom der entgegengesetzten Art trifft und sich mit diesem vereinigt, um ein neues Molekül des zusammengesetzten Körpers zu bilden. In jedem zusammengesetzten Körper wird daher eine gewisse Anzahl von Molekülen in jedem Augenblicke in seine konstituierenden Atome zersplittert. In höheren Temperaturen wird diese Anzahl so groß, dass sie das Phänomen der Dissociation hervorbringt, welches von St. Claire Deville¹⁾ studiert wurde.

125. Nun nimmt Clausius an, dass gerade auf diese konstituierenden Atome in den Zwischenzeiten, in denen sie frei sind, die elektromotorische Kraft wirkt, indem sie sie ein wenig von den Wegen ablenkt, denen sie sonst gefolgt wären, und dadurch bewirkt, dass die positiven Konstituenten im ganzen mehr nach der positiven als nach der negativen Richtung sich bewegen und die negativen Constituenten mehr nach der negativen als nach der positiven Richtung. Die elektromotorische Kraft reißt also nicht selbst die Moleküle auseinander und vereinigt sie wieder, sondern sie findet schon dieses Zerreißen und Wiedervereinigen vor und beeinflusst nur die Bewegung der Konstituenten während der Zeit, dass sie frei sind. Die Grösse dieser Beeinflussung ist proportional der elektromotorischen Kraft, wenn die Temperatur gegeben ist. Je höher aber die Temperatur ist, um so größer ist die molekulare Bewegung und um so zahlreicher sind die freien Konstituenten. Daher wächst die Leitungsfähigkeit der Elektrolyte, wenn die Temperatur steigt.

Die Wirkung der Temperatur ist bei den Elektrolyten entgegengesetzt wie bei den Metallen. Bei diesen wächst der Widerstand,

¹⁾ Leçons sur la dissociation, professées devant la Société Chimique. L. Hachette et Comp. 1866.

wenn die Temperatur steigt. Diese Verschiedenheit der Wirkung der Temperatur wird zuweilen als Probe benutzt, ob ein Leiter metallisch oder elektrolytisch leitet. Das beste Prüfungsmittel aber ist das Vorhandensein der Polarisation; denn gerade, wenn die Menge der freien Ionen zu klein ist, um beobachtet oder gemessen zu werden, kann ihre Anwesenheit durch die elektromotorische Kraft, welche sie erzeugen, angezeigt werden.

126. Kohlrausch ¹⁾ findet, daß, wenn die elektromotorische Kraft ein Volt auf 1 cm Länge des Elektrolyten ist, daß dann, wenn der Elektrolyt nur wenig von reinem Wasser verschieden ist, die Geschwindigkeit des Wasserstoffs bei 13° ungefähr 0,0029 cm in der Sekunde ist und daß die Kraft, die wirklich erfordert wird, um 1 g Wasserstoff in der Lösung mit einer Geschwindigkeit von 1 cm in der Sekunde durch die Lösung zu bewegen, gleich ist der eines Gewichtes von 330 000 000 kg.

Die Geschwindigkeiten der Komponenten der einbasischen Säuren und ihrer Salze stehen, wie Kohlrausch fand, im folgenden Verhältnis:

Tabelle I.

H	K	NH ₄	Na	Li	1/2 Ba	1/2 Sr	1/2 Ca	1/2 Mg	J
273	48	46	30	19	31	28	24	21	55
		Br	Cl	Fl	NO ₃	ClO ₃	C ₂ H ₃ O ₂		
		53	50	29	47	36	22		

127. Die spezifische molekulare Leitungsfähigkeit (*l*) eines Elektrolyten ist die Summe der Geschwindigkeiten seiner Komponenten ²⁾ und die wirkliche Leitungsfähigkeit einer verdünnten Lösung wird gefunden, wenn man die Zahl *l* mit der Anzahl der Gramme der Substanz in einem Liter multipliziert und durch das Molekulargewicht der Substanz dividiert, das des Wasserstoffs gleich 1 genommen.

128. Wir haben Gründe, zu glauben, daß das Wasser kein Elektrolyt ist und daß es nicht ein Leiter des elektrischen Stromes ist. Es ist außerordentlich schwer, Wasser frei von fremder Substanz zu erhalten. Kohlrausch ³⁾ jedoch hat so reines Wasser erhalten, daß sein Widerstand enorm gegen den des gewöhnlichen destillierten Wassers war. Als es 4,3 Stunden lang der Luft ausgesetzt war, stieg seine Leitungsfähigkeit um 70 Prozent und in 1060 Stunden wuchs sie beinahe um das Vierzigfache. Nachdem es lange der Luft ausgesetzt war, wurde seine Leitungsfähigkeit in 4 1/2 Stunden durch die Wirkung von Tabaks-

¹⁾ Göttinger Nachrichten, 5. März 1874; 17. Mai 1876 und 4. April 1877.

²⁾ S. Cavendish Papers, p. 446, 447.

³⁾ Poggendorffs Ann., Ergänzungsband VIII (1876), S. 7, 9, 11.

rauch mehr als verdoppelt. Wasser, das in Glasgefäßen aufgehoben wird, löst bald genügend fremde Stoffe auf, um leicht leiten zu können.

Kohlrausch¹⁾ hat den Widerstand von Wasser bestimmt, welches einen sehr kleinen Prozentsatz von verschiedenen Elektrolyten enthielt, und er findet, daß die Resultate sehr gut mit der Hypothese übereinstimmen, daß die Geschwindigkeit, mit welcher jedes Ion durch die Flüssigkeit wandert, proportional ist der elektromotorischen Kraft, wobei die der Einheit der elektromotorischen Kraft entsprechende Geschwindigkeit für verschiedene Ionen verschieden ist, aber für dasselbe Ion dieselbe ist, welches auch das andere Ion ist, mit welchem es verbunden ist. Die Geschwindigkeiten der verschiedenen Ionen in Zentimetern in der Sekunde, die einer elektromotorischen Kraft von einem Volt entsprechen, sind in Tabelle II. gegeben:

Tabelle II.

H	K	NH ₄	Na	Li	Ba	Sr	Cu	Mg
0,0029	0,00051	0,00049	0,00032	0,00020	0,00033	0,00030	0,00025	0,00022
J	Br	Cl	F	N ₂ O ₃	Cl ₂ O ₃	C ₂ H ₃ O ₂		
0,00058	0,00056	0,00053	0,00031	0,00050	0,00038	0,00023		

Wenn das Wasser einen großen Prozentsatz von fremden Stoffen enthält, so sind die Geschwindigkeiten der Ionen nicht mehr dieselben, da die Ionen dann nicht mehr durch Wasser, sondern durch eine Flüssigkeit von ganz verschiedenen physikalischen Eigenschaften ihren Weg zu machen haben.

Aus Tabelle III.²⁾ sieht man, daß bei Schwefelsäure in Wasser zwar für einen geringen Prozentgehalt von Schwefelsäure die Leitungsfähigkeit proportional dem Prozentgehalt der Säure ist, daß aber, wenn die Konzentration der Säure größer wird, die Leitungsfähigkeit langsamer wächst, bis ein Maximum der Leitungsfähigkeit erreicht wird. Nach diesem Maximum bringt ein Zusatz von Säure eine Verringerung des Leitungsvermögens hervor³⁾.

¹⁾ Pogg. Ann. 154 (1875), S. 215; 159 (1876), S. 242. Phil. Mag., Juni 1875.

²⁾ S. auch weiter unten Nr. 232.

³⁾ Ein ähnliches Resultat wurde mit Salpetersäure und einigen zähen Salzlösungen gefunden.

Tabelle III.

Leitungsfähigkeit der Schwefelsäure bei 18° C., bezogen auf die des Quecksilbers bei 0° C. als Einheit.

Prozentgehalt an H ₂ SO ₄	10 ⁸ K	Prozentgehalt an H ₂ SO ₄	10 ⁸ K	Prozentgehalt an H ₂ SO ₄	10 ⁸ K
1	429	60	3487	87	944
2,5	1020	65	2722	88	965
5	1952	70	2016	89	986
10	3665	75	1421	90	1005
15	5084	78	1158	91	1022
20	6108	80	1032	92	1030
25	6710	81	985	93	1024
30	6912	82	947	94	1001
35	6776	83	924	95	958
40	6361	84	915	96	895
45	5766	85	916	97	750
50	5055	86	926	99,4	80
55	4280				

129. Sauerstoff und Wasserstoff, welche in so vielen Experimenten mit Wasser, das fremde Stoffe aufgelöst enthält, an den Elektroden auftreten, sind daher nicht die durch direkte Elektrolyse getrennten Ionen des Wassers, sondern sie sind sekundäre Produkte der Elektrolyse der gelösten Substanz. Wenn z. B. das Kation ein Metall ist, welches Wasser zersetzt, so verbindet es sich mit einem Äquivalent Sauerstoff und erlaubt den beiden Äquivalenten Wasserstoff in Gasform zu entweichen. Das Anion kann ein zusammengesetztes Radikal sein, welches nicht in freiem Zustande existieren kann, aber welches *in statu nascendi* existiert und ein oder mehrere Äquivalente eines elektronegativen Elements enthält, welches auf das Wasser wirkt und Sauerstoff frei macht.

Dritte Klasse: Dielektrika.

130. Die dritte Klasse von Körpern hat einen elektrischen Widerstand, der so viel gröfser ist als der der Metalle oder selbst als der des Elektrolyten, dafs man diese Körper oft Isolatoren der Elektrizität nennt. Alle Gase, einige Flüssigkeiten, welche nicht Elektrolyte sind, wie Terpentinöl, Naphta u. s. w., und einige feste Körper, wie Gutta-percha, Kautschuk aller Art, Bernstein und Harze, krystallisierte Elektrolyte, Glas bei niedriger Temperatur, sind Isolatoren.

Sie werden Isolatoren genannt, weil sie einen Strom von Elektrizität nicht durch sich hindurchlassen. Sie werden Dielektrika genannt, weil man gewisse elektrische Wirkungen durch sie hindurchsenden kann. Nach der in diesem Werke angenommenen Theorie bewirkt eine elektromotorische Kraft, wenn sie auf ein Dielektrikum wirkt, dafs die Elektrizität in diesem verschoben wird und zwar in der Richtung der elektromotorischen Kraft; die Gröfse dieser Verschiebung ist proportional der elektromotorischen Kraft, hängt aber auch von der Natur des Dielektrikums ab, indem bei gleicher elektromotorischer Kraft die Verschiebung gröfser ist in festen und flüssigen Körpern als in Luft und anderen Gasen.

Wenn die elektromotorische Kraft wächst, so ist die Zunahme der elektrischen Verschiebung einem elektrischen Strome äquivalent, der in derselben Richtung verläuft, in welcher die elektromotorische Kraft wirkt. Ist die elektromotorische Kraft konstant, so ist noch eine Verschiebung, aber kein Strom vorhanden. Nimmt die elektromotorische Kraft ab, so ist die Verringerung der elektrischen Verschiebung äquivalent einem Strome in entgegengesetzter Richtung.

131. In einem Dielektrikum ruft die elektrische Verschiebung eine innere elektromotorische Kraft hervor, deren Richtung der der Verschiebung entgegengesetzt ist und welche die Verschiebung zu Null zu machen strebt. Der Sitz dieser inneren Kraft ist in dem Dielektrikum überall da, wo eine Verschiebung existiert.

Um eine elektrische Verschiebung in einem Dielektrikum hervorzubringen, ist ein Aufwand von Arbeit erforderlich, welche durch das halbe Produkt der elektromotorischen Kraft in die elektrische Verschiebung gemessen wird. Diese Arbeit wird als Energie in dem Dielektrikum aufgespeichert, und sie ist die Quelle der Energie eines elektrisierten Systems, welche dieses fähig macht, mechanische Arbeit zu leisten.

Die Gröfse der durch eine gegebene elektromotorische Kraft hervorgebrachten Verschiebung ist in den verschiedenen Dielektrika verschieden. Das Verhältniss der Verschiebung in einem beliebigen Dielek-

trikum zu der Verschiebung in einem Vakuum, wenn beide von derselben elektromotorischen Kraft herrühren, wird die spezifische induktive Kapazität des Dielektrikums oder kürzer die Dielektrizitätskonstante genannt. Diese Gröfse ist in dichten Körpern gröfser als in dem sogenannten Vakuum und ist angenähert gleich dem Quadrat des optischen Brechungsindex. So findet Dr. L. Boltzmann¹⁾ für verschiedene Substanzen:

	D	$\sqrt{D}$	Brechungsindex
Schwefel (gegossen)	3,84	1,960	2,040
Kolophonium	2,55	1,597	1,543
Paraffin	2,32	1,523	1,536
Ebonit (Hartgummi)	3,15	1,775	

Für eine aus einem Schwefelkrystall geschnittene Kugel findet Boltzmann durch elektrische Experimente D für die drei Hauptachsen und vergleicht diese Werte mit den aus den drei Brechungsindizes berechneten.

Aus elektrischen Experimenten	$D_1 = 4,773$	$D_2 = 3,970$	$D_3 = 3,811$
Aus optischen Messungen	$D_1 = 4,596$	$D_2 = 3,886$	$D_3 = 3,591$

(Wiener Sitzungsberichte, 9. Jan. 1873.)

132. Schiller (Pogg. Ann. 152, S. 535) bestimmte die Dauer der elektrischen Schwingungen, wenn ein Kondensator durch einen Elektromagneten entladen wird.

Er findet auf diese Weise die folgenden Werte der dielektrischen Konstanten von verschiedenen Substanzen und vergleicht sie mit denen, die Siemens mit der Methode der selbstthätigen Wippe gefunden hat.

¹⁾ Pogg. Ann. 151 (1874), S. 482.

	Schiller	Siemens	μ^2	μ
Ebonit (Hartgummi)	2,21	2,76	—	—
Reiner Kautschuk (braun)	2,12	2,34	2,25	1,50
Vulkanisierter, grauer Kautschuk	2,69	2,94	—	—
Paraffin, rasch gekühlt, fast durchsichtig	1,68	—	—	—
Paraffin, langsam gekühlt, milchweiss	1,81	1,92	2,19	1,48
„ andere langsam gekühlte Platte	1,89	2,47	2,34	1,53
Halbweisses Glas	2,96	4,12	—	—
„ „	3,66	—	—	—
Weisses Spiegelglas	5,83	6,34	—	—

P. Silow (Pogg. Ann. 156, 1875, S. 395) ¹⁾ findet für Terpen-
tinöl:

$$D = 2,21 \quad \sqrt{D} = 1,490 \quad \mu_{\infty} = 1,456$$

Faraday war nicht im Stande, einen Unterschied in den dielektrischen Konstanten verschiedener Gase zu finden. Dr. Boltzmann ²⁾ jedoch erreichte das durch eine sehr sinnreiche Methode, indem er diese Konstanten für verschiedene Gase bei 0° C. und dem Druck einer Atmosphäre bestimmte.

	D	$\sqrt{D}$	μ
Luft	1,000590	1,000295	1,000294
Kohlensäure	1,000946	1,000473	1,000449
Wasserstoff	1,000264	1,000132	1,000138
Kohlenoxyd	1,000690	1,000345	1,000340
Stickoxyd	1,000994	1,000497	1,000503
Ölbildendes Gas	1,001312	1,000656	1,000678
Sumpfgas	1,000944	1,000472	1,000443

¹⁾ S. auch 158 (1876), S. 306 u. ff.

²⁾ Pogg. Ann. 151 (1875), S. 403.

Disruptive Entladung.

133. Wenn die an einem Punkte eines Dielektrikums wirkende elektromotorische Kraft stetig wächst, so wird endlich eine Grenze erreicht, wo dann eine plötzliche elektrische Entladung durch das Dielektrikum hindurch stattfindet, im allgemeinen begleitet von Licht und Schall. Das Dielektrikum, wenn es fest ist, wird oft durchbohrt, zerrissen oder durchbrochen und Teile von ihm werden oft in Dampf-Form zerstreut. Dieses Phänomen ist offenbar dem Zerreißen eines Körpers analog, der einer beständig wachsenden Spannung ausgesetzt ist. Diese Analogie ist so vollständig, daß wenn wir das Verhalten der Medien unter der Einwirkung einer elektromotorischen Kraft beschreiben, wir dieselben Ausdrücke anwenden können, welche wir auf Körper anwenden, die unter der Einwirkung eines Zuges stehen. So entsprechen elektromotorische Kraft und elektrische Verschiebung der gewöhnlichen Kraft und gewöhnlichen Verschiebung; die elektromotorische Kraft, welche disruptive Entladung hervorbringt, entspricht dem Zuge, welcher einen Körper zerreißt. Leitung oder Durchgang der Elektrizität entspricht einer permanenten Biegung.

Wenn wir z. B. die Verdrehung eines Drahtes einerseits und den Durchgang der Elektrizität durch einen Körper anderseits betrachten, so wird das Moment des Kräftepaares, welches den Draht verdreht, der elektromotorischen Kraft entsprechen, welche auf den Körper wirkt, und der Winkel, durch welchen der Draht tordiert ist, wird der elektrischen Verschiebung entsprechen. Falls der Draht, nachdem die Kraft entfernt ist, wieder in seine frühere Gestalt zurückkehrt und vollständig untordiert wird, nennt man ihn elastisch. Ein solcher Draht entspricht einem Dielektrikum, welches bei der angewandten elektromotorischen Kraft als vollkommener Isolator wirkt. Wächst das tordierende Kräftepaar über eine gewisse Grenze hinaus, so giebt der Draht nach und zerreißt. Dieses entspricht der disruptiven Entladung, und die absolute Festigkeit des Drahtes entspricht der größten elektromotorischen Kraft, welche das Dielektrikum aushalten kann. Wir können sie seine elektrische Festigkeit nennen.

Wenn der Draht, bevor das Reißen stattfindet, nachgiebt, so daß er nicht mehr ganz untordiert bleibt, selbst, wenn die Kraft entfernt ist, so nennt man ihn unvollkommen elastisch. Er entspricht einem Dielektrikum, welches in einem gewissen Grade Elektrizität leitet.

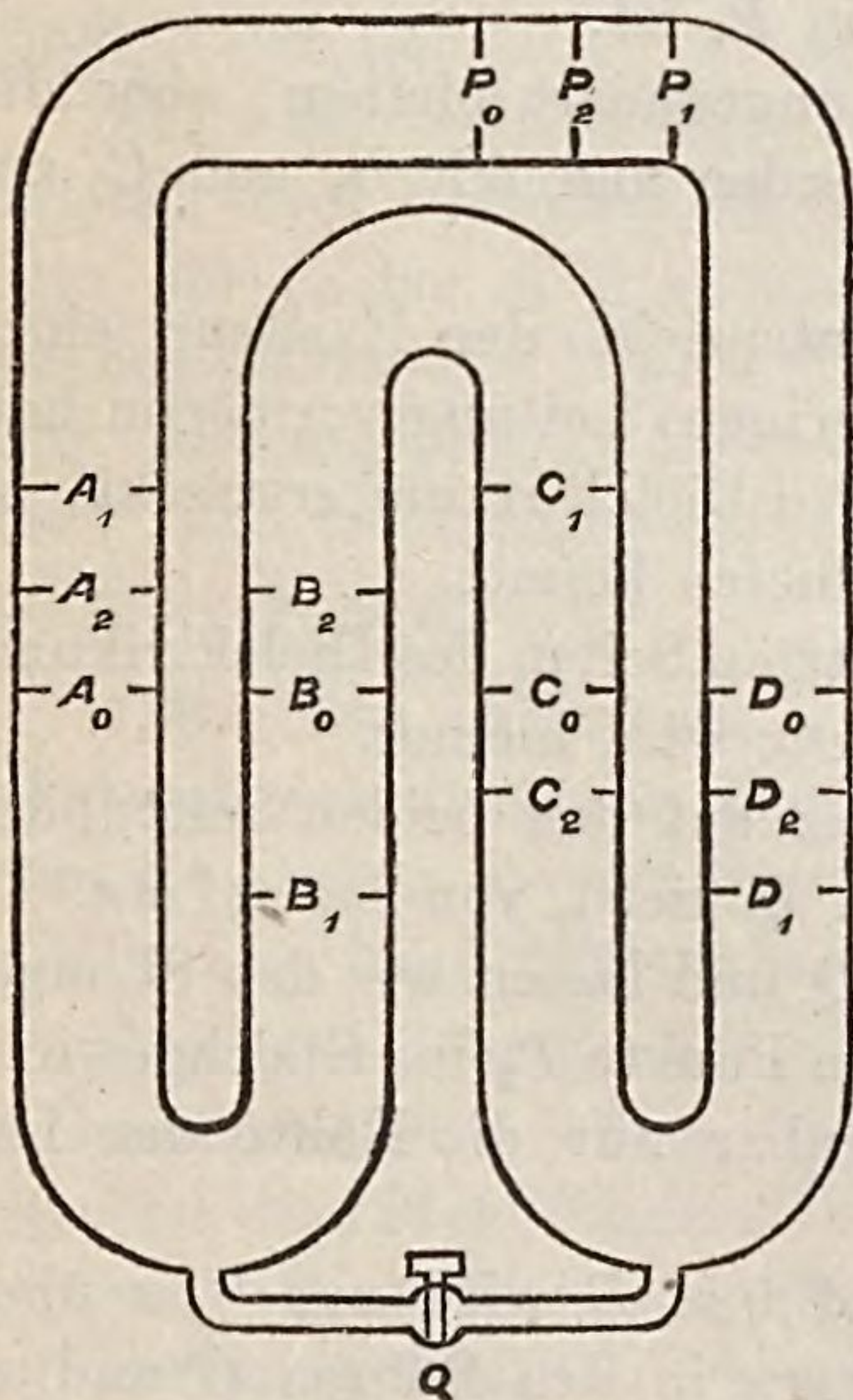
Wenn dem Drahte gar keine permanente Torsion durch eine Kraft erteilt werden kann, ohne daß er bricht, so nennt man den Draht spröde oder brüchig. Ebenso können wir die dielektrischen Medien, wie Luft, welche Elektrizität nur durch disruptive Entladung durchlassen, gewissermaßen elektrisch brüchig nennen.

134. Viele Drähte haben die Eigenschaft, daß, wenn sie einige Zeit hindurch tordiert gehalten und nachher frei gelassen werden, daß sie dann sich sofort zurückdrehen, aber um einen kleineren Winkel als der war, um den sie gedreht waren. Im Laufe der Zeit aber drehen sie sich weiter zurück, aber sehr langsam, so daß der Prozeß oft Tage oder Wochen lang fortgeht. Ebenso geben einige Dielektrika, wie das Glas einer Leydener Flasche oder die Guttapercha eines submarinen Kabels, wenn sie eine Zeit hindurch einer elektromotorischen Kraft unterworfen sind und dann in einen geschlossenen Stromkreis gebracht werden, eine augenblickliche Entladung, welche kleiner ist als die ursprüngliche Ladung. Nach dieser Entladung aber sind sie im Stande, die Rückstandentladungen zu geben, welche schwächer und schwächer werden, und wenn der Stromkreis geschlossen gehalten wird, so wird allmählich eine Menge Elektrizität durch den Stromkreis ablaufen; wobei der Strom immer schwächer und schwächer wird, je mehr sich die Ladung erschöpft.

Mechanische Veranschaulichung der Eigenschaften eines Dielektrikums.

135. Fünf Röhren von gleichem Querschnitt, A , B , C , D und P , sind in einem geschlossenen Kreise angeordnet, wie in der Figur. A , B , C , D sind vertikal und gleich und P ist horizontal.

Fig. 29.



Die unteren Hälften von A , B , C , D sind mit Quecksilber gefüllt, ihre oberen Hälften und die horizontale Röhre P mit Wasser.

Eine Röhre mit einem Sperrhahn Q verbindet den unteren Teil von A und B mit dem von C und D und ein Stempel P kann in der horizontalen Röhre gleiten.

Fangen wir damit an, daß wir annehmen, die Höhe des Quecksilbers in den vier Röhren sei dieselbe. Sie sei angegeben durch A_0 , B_0 , C_0 , D_0 , der Stempel befinde sich in P_0 und der Quetschhahn sei geschlossen.

Nun werde der Stempel von P_0 bis P_1 , eine Strecke a , bewegt. Dann wird, da die Querschnitte aller Röhren gleich sind, die Höhe des Quecksilbers

in A und C um eine Strecke a steigen bis A_1 und C_1 , und das Quecksilber in B und D wird um eine gleiche Strecke a sinken bis B_1 und D_1 .

Die Druckdifferenz auf den beiden Seiten der Röhre wird durch $4a$ dargestellt.

Dieses Arrangement kann dazu dienen, um den Zustand eines Dielektrikums darzustellen, auf welches eine elektromotorische Kraft $4a$ wirkt.

Der Überschuss von Wasser in der Röhre D kann als Darstellung für eine positive Ladung der Elektrizität auf einer Seite eines Dielektrikums dienen, und der Überschuss von Quecksilber in der Röhre A kann die negative Ladung auf der andern Seite darstellen. Der Überschuss des Druckes in der Röhre P auf der an D anliegenden Seite des Stempels wird dann den Überschuss des Potentials auf der positiven Seite des Dielektrikums darstellen.

Wenn der Stempel sich frei bewegen kann, so wird er sich wieder nach P_0 zurückbewegen und dort im Gleichgewicht sein. Das stellt die vollständige Entladung des Dielektrikums dar.

Während der Entladung herrscht die umgekehrte Bewegung der Flüssigkeiten durch die ganze Röhre hindurch und dies stellt diejenige Änderung der elektrischen Verschiebung dar, welche, wie wir angenommen haben, in einem Dielektrikum stattfindet.

Ich habe angenommen, daß alle Teile des Röhrensystems mit inkompressiblen Flüssigkeiten gefüllt sind, um die Eigenschaft jeder elektrischen Verschiebung darzustellen, daß durch sie keine wirkliche Anhäufung von Elektrizität an einer Stelle stattfindet.

Untersuchen wir jetzt, welche Wirkung das Öffnen des Sperrhahns Q haben wird, während der Stempel P in P_1 ist.

Das Niveau von A_1 und D_1 wird ungeändert bleiben, aber die Niveaux von B und C werden gleich werden und mit B_0 und C_0 zusammenfallen.

Die Öffnung des Sperrhahns Q entspricht der Existenz eines Teiles des Dielektrikums, welcher ein geringes Leitungsvermögen hat, welcher sich aber nicht durch das ganze Dielektrikum erstreckt, so daß er dem Strome ein offenes Bett darbieten könnte.

Die Ladungen auf den entgegengesetzten Seiten des Dielektrikums bleiben isoliert, aber ihre Potentialdifferenz wird kleiner.

In der That sinkt die Druckdifferenz auf den beiden Seiten des Stempels, während die Flüssigkeit durch Q fließt, von $4a$ auf $2a$.

Schließen wir jetzt den Sperrhahn Q und lassen wir den Stempel P sich frei bewegen, so wird er an einem Punkte P_2 ins Gleichgewicht kommen und die Entladung wird offenbar nur die Hälfte der Ladung sein.

Das Niveau des Quecksilbers in A und B wird um $\frac{1}{2}a$ über ihrem Anfangsniveau sein und das Niveau in den Röhren C und D

wird um $\frac{1}{2}a$ unter ihrem Anfangsniveau sein. Dies wird durch die Niveaux A_2, B_2, C_2, D_2 angezeigt.

Wird der Stempel nun festgestellt und der Hahn geöffnet, so wird Quecksilber von B nach C fließen, bis das Niveau in den beiden Röhren wieder in B_0 und C_0 ist. Es wird dann eine Druckdifferenz gleich a auf den beiden Seiten des Stempels P herrschen. Wird nun der Hahn geschlossen und kann der Stempel sich frei bewegen, so wird er wieder an einem Punkte P_3 , mitten zwischen P_2 und P_0 , ins Gleichgewicht kommen. Dieses entspricht der Rückstandladung, welche beobachtet wird, wenn ein geladenes Dielektrikum zuerst entladen und dann sich selbst überlassen wird. Es sammelt allmählich wieder einen Teil seiner Ladung, und wenn dieser wieder entladen ist, bildet sich eine dritte Ladung u. s. f. Die einzelnen Ladungen nehmen an Grösse ab. In dem Falle unseres erläuternden Experiments ist jede Ladung die Hälfte der vorhergehenden und die Entladungen, welche $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ u. s. w. von der ursprünglichen Ladung sind, bilden eine Reihe, deren Summe gleich der ursprünglichen Ladung ist.

Wenn wir, statt den Hahn zu öffnen und zu schliessen, ihn nur nahezu, aber nicht ganz während des ganzen Experiments geschlossen gelassen hätten, so würden wir einen Fall haben, der demjenigen der Elektrisierung eines Dielektrikums ähnlich ist, welches ein vollkommener Isolator ist und doch die Erscheinung bietet, die man „elektrische Absorption“ nennt.

Um den Fall darzustellen, in welchem wirkliche Leitung durch das Dielektrikum stattfindet, müssen wir entweder den Stempel undicht machen, oder wir müssen eine Verbindung zwischen den höchsten Punkten der Röhren A und D herstellen.

Auf diese Weise können wir ein mechanisches Bild von den Eigenschaften eines Dielektrikums jeder Art konstruieren, ein Bild, in welchem die beiden Elektrizitäten durch zwei wirkliche Flüssigkeiten und das elektrische Potential durch den Flüssigkeitsdruck dargestellt wird. Ladung und Entladung werden durch die Bewegung des Stempels P und elektromotorische Kraft durch die resultierende Kraft auf den Stempel dargestellt.

136. Die elektrische Festigkeit eines dielektrischen Mediums hängt von der Natur des Mediums, von seiner Dichtigkeit und Temperatur ab. So ist die zur Hervorbringung einer disruptiven Entladung erforderliche Kraft grösser in Glas oder Ebonit als in Luft.

Die elektrische Festigkeit der Luft oder eines anderen Gases kann bestimmt werden, indem man Funken durch einen Teil des Gases zwischen zwei Metallkugeln überspringen läßt. Wenn das Experiment in einem Glasgefässe ausgeführt wird, aus welchem die Luft durch eine Luftpumpe entfernt werden kann, so findet man, daß die zur

Hervorbringung der Entladung nötige elektromotorische Kraft geringer wird, wenn der Druck von dem einer Atmosphäre bis auf ungefähr 3 mm Quecksilber verkleinert wird. Wenn Elektrizität in konstantem Verhältnis zugeführt wird, so werden die Funken kleiner und zahlreicher, bis zuletzt ein kontinuierlicher Strom vorhanden zu sein scheint. Wenn jedoch die Evakuierung weiter getrieben wird, so wächst die elektrische Festigkeit wieder, bis in dem vollkommensten, bis jetzt erreichten Vakuum eine solch große elektromotorische Kraft erforderlich ist, um einen Funken zwischen Elektroden im Abstände von 0,6 cm hervorzubringen, daß die Entladung nicht zwischen den Elektroden vor sich geht, sondern um die Außenseite des Gefäßes herum durch eine Schicht von 20 cm der Luft von gewöhnlichem Drucke. Es sollte daher scheinen, als ob ein vollkommenes Vakuum dem Durchgange der Elektrizität einen ganz unüberwindlichen Widerstand leistet. Eine geringe Menge Gas dagegen, die in den leeren Raum eingeführt wird, macht ihn unfähig, selbst einer kleinen elektromotorischen Kraft Widerstand zu leisten. Diese Verringerung der elektrischen Festigkeit geht aber nicht weiter, wenn die Dichtigkeit des Gases noch weiter wächst, sondern bei Drucken von einem Zentimeter und höher hinauf wächst die elektrische Festigkeit, wenn die Dichtigkeit wächst.

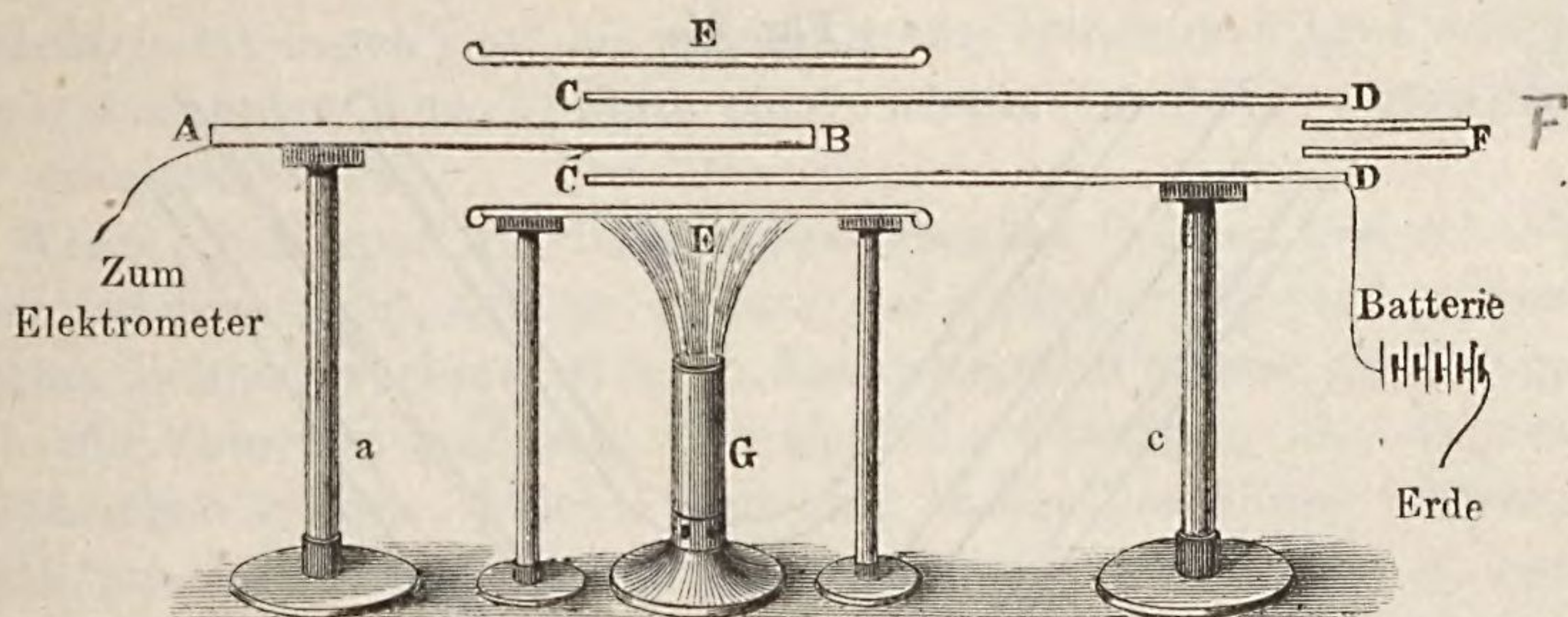
137. Die elektrische Festigkeit der Luft wird rasch kleiner, wenn die Temperatur steigt. Die erhitzte Luft, welche von einer Flamme aufsteigt, leitet die Elektrizität gut. Das beste Mittel, die Elektrizität von der Oberfläche eines festen Dielektrikums zu entfernen, ist das, daß man den elektrischen Körper durch eine Flamme zieht. In den meisten Experimenten mit erhitzter Luft ist die Luft in Bewegung. Es ist daher wünschenswert, daß Experimente über die Leitungsfähigkeit der Luft bei verschiedenen Temperaturen angestellt werden, bei denen die Luft in einem geschlossenen Gefäße enthalten und frei von Strömungen ist.

138. Um die isolierenden Eigenschaften der Luft und anderer Gase zu untersuchen, machte ich folgenden Versuch:

Eine Röhre von $\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser, CD , wird von einem isolierenden Gestell c getragen. Ein Stab, AB , von $\frac{1}{4}$ Zoll Durchmesser, liegt auf dem isolierenden Gestell a , so daß ungefähr 6 Zoll des Stabes innerhalb der Röhre sind und eine cylindrische Schale von Luft von ungefähr $\frac{1}{8}$ Zoll Dicke zwischen ihm und der Innenseite der Röhre sich befindet. Die Röhre ist mit der einen Elektrode einer Batterie von 50 Leclanché-Elementen verbunden, während die andere Elektrode mit der Erde in Verbindung ist. Der Stab steht mit einer Elektrode eines Thomson'schen Quadratelektrometers in Verbindung, dessen andere Elektrode mit der Erde verbunden ist. Eine Röhre F , welche so befestigt ist, daß sie die Röhre CD nicht berührt, wird dazu benutzt, einen Strom von heißer Luft

oder von Dampf durch die Röhre *CD* zu schicken. Der Teil der Röhre *CD*, welcher den Stab *AB* enthält, ist von einer weiteren Röhre *E* von dickem Metall umgeben, welche durch einen Gasbrenner erhitzt

Fig. 30.



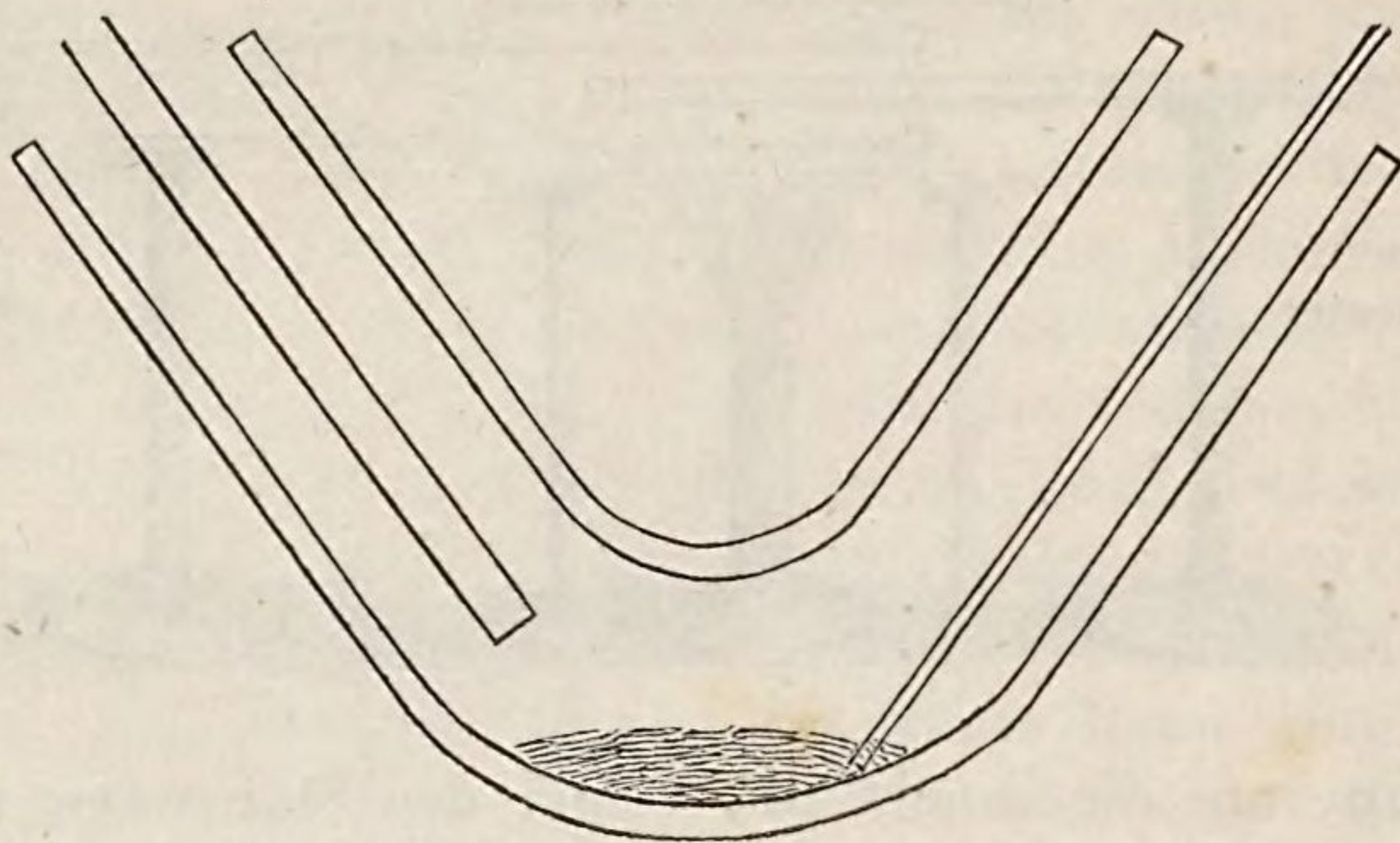
werden kann, um die innere Röhre und den Stab warm zu erhalten, ohne sie dem Strome der Verbrennungsprodukte des Brenners auszusetzen.

Die Empfindlichkeit dieses Apparats zeigt sich durch die Wirkung, welche eine kleine, der Röhre *E* mitgeteilte Ladung hervorbrachte. Das Elektrometer wurde unmittelbar abgelenkt, in Folge der Induktion zwischen der Röhre und dem Stabe *AB*. Der Stab *AB* wurde dann zur Erde abgeleitet, so daß das Elektrometer auf Null stand, während die Röhre auf höherem Potential blieb. Wenn jetzt irgend welche Leitung durch die Luft zwischen der Röhre und dem Stabe stattfinden sollte, so würde es sich am Elektrometer zeigen. Indes konnte keine Leitung beobachtet werden, selbst nicht nach Verlauf einer Viertelstunde, auch nicht, als heiße Luft und Dampf durch die Röhre geblasen wurde. Am Ende des Experiments wurde die Röhre zur Erde entladen, wobei eine negative Ablenkung des Elektrometers beobachtet wurde, zum Beweis, daß die Röhre während des ganzen Experiments geladen geblieben war.

139. Nachher wurden andere Experimente angestellt, in welchen Quecksilber und Natrium in einer gebogenen Glasröhre, die durch eine Batterie von 50 Leclanché-Elementen auf ein hohes Potential gebracht war, zum Sieden gebracht wurden. Ein dicker Kupferdraht (Fig. 31) wurde auf einem isolierenden Gestell so befestigt, daß das Ende des Drahtes innerhalb der Glasröhre und von dem Dampfe des Metalles umgeben war. Es war notwendig, daß man den Draht nicht die Röhre berühren liefs, da Glas bei hohen Temperaturen ein guter Leiter ist. Es war auch notwendig, darauf zu sehen, daß nicht die Verbrennungsprodukte des Bunsenschen Brenners mit dem Drahte in Berührung kamen, nachdem sie durch die heiße Röhre elektrisch geworden waren.

Der Draht war mit dem Elektrometer verbunden, aber keine Spur von Leitung der Elektrizität konnte beobachtet werden, selbst als das Quecksilber lebhaft siedete und sein Dampf sich an dem Drahte kondensierte. Aber immer, wenn sich so viel Quecksilber an dem

Fig. 31.



Drahte angesammelt hatte, daß ein Tropfen von dem Ende des Drahtes herunterfiel, entstand eine Ablenkung des Elektrometers, weil der Tropfen durch Induktion von der Röhre geladen war und das Verschwinden dieser Ladung das Elektrometer beeinflusste. Dies war aber kein Zeichen von Leitung durch den metallischen Dampf, sondern es zeigte bloß an, daß der Apparat in einem solchen elektrischen Zustande war, daß eine noch so geringe Leitung, wenn sie stattgefunden hätte, einen merklichen Ausschlag des Elektrometers hätte hervorbringen müssen.

Es ist schwierig, diese Experimente über das Isolierungsvermögen von heißen Gasen und Dämpfen mit den wohlbekannten Erscheinungen in Einklang zu bringen, daß die Elektrizität längs eines Stromes erhitzter Materie, die von einer Flamme oder auch von einem rotglühenden Metall aufsteigt, übergeführt wird. Dieser Strom wirkt wie ein guter Elektrizitätsleiter zwischen der Flamme und den etwa 1 bis 3 Fuß über ihr befindlichen Körpern, wo die Temperatur des aufsteigenden Stromes viel kleiner ist, als sie in dem Experiment mit der Röhre und dem Stabe war.

140. Die ganze Theorie der elektrischen Eigenschaften der Gase ist in einem noch sehr unvollkommenen Zustande. Nach der kinetischen Gastheorie sind ihre Moleküle in einem Zustande lebhafter Bewegung, so daß sie fortwährend gegeneinander stoßen. Die Geschwindigkeit dieser Bewegung ist um so größer, je höher die Temperatur ist. Es sollte daher scheinen, daß die elektrische Leitung der Gase von der Art der Konvektion ist. Bei jedem Zusammenstoß würde sich die gesamte Ladung zweier Moleküle gleichmäßig zwischen ihnen

verteilen und so würde das Streben der Bewegung sein, die Ladungen aller Moleküle gleich zu machen.

Aber wir können kaum eine Theorie dieser Art zulassen, wenn wir bedenken, daß wir bisher noch keinen Beweis von der Leitung der Elektrizität durch Luft bei gewöhnlichem Druck und gewöhnlicher Temperatur unter dem Einfluß einer schwachen elektromotorischen Kraft erhalten haben.

Wenn ein Körper frei ist von vorstehenden Spitzen und scharfen Ecken und man findet, daß er, wenn er auf niedriges Potential gebracht ist, seine Leitung verliert, so kann dieses Resultat immer der Leitung durch die Substanz hindurch oder über die Oberfläche des Apparats zugeschrieben werden, welche man zum Halten des Körpers braucht. Je vollkommener isolierend wir diesen Apparat machen, um so langsamer verliert der elektrische Körper seine Ladung, so daß es wahrscheinlich ist, daß, wenn wir einen elektrischen Körper auf ein vollkommen isolierendes Gestell bringen, so daß er seine Ladung nur durch Leitung durch die Luft verlieren könnte, er sie dann nie verlieren würde.

Elektrische Erscheinungen beim Turmalin.

141. Gewisse Krystalle von Turmalin und anderen Mineralien besitzen Eigenschaften, die man elektrische Polarität nennen kann. Nehmen wir an, ein Turmalinkrystall sei auf gleichmäßiger Temperatur und ganz frei von Elektrizität auf seiner Oberfläche. Nun steige die Temperatur, während der Krystall isoliert bleibt. Dann wird man das eine Ende positiv, das andere negativ elektrisch finden. Man nehme der Oberfläche diese freie Elektrizität durch eine Flamme oder auf andere Weise fort, dann wird, wenn der Krystall noch weiter erwärmt wird, Elektrizität derselben Art wie früher auftreten; wenn aber der Krystall abgekühlt wird, so wird das Ende, welches positiv war, als der Krystall erwärmt wurde, negativ werden.

Diese Elektrisierungen werden an den Enden der krystallographischen Hauptachse beobachtet. Manche Krystalle sind an dem einen Ende durch eine sechsseitige, an dem andern durch eine dreiseitige Pyramide begrenzt. In diesen wird dasjenige Ende, welches die sechsseitige Pyramide enthält, positiv, wenn der Krystall erwärmt wird.

Sir W. Thomson nimmt an, daß jeder dieser und anderer hemiödrischer Krystalle eine bestimmte elektrische Polarität hat, deren Intensität von der Temperatur abhängt. Wird die Oberfläche durch eine Flamme gezogen, so wird jeder Teil der Oberfläche elektrisch und zwar in solchem Grade, daß dadurch für alle äußeren Punkte gerade die Wirkung der inneren Polarität neutralisiert wird. Dann

übt der Krystall keine elektrische Wirkung nach außen aus, hat auch kein Bestreben, seine Elektrisierung zu ändern. Wenn er aber erwärmt oder abgekühlt wird, so wird die innere Polarisation jedes Teilchens des Krystalls geändert und kann also nicht länger durch die Oberflächenelektrisierung neutralisiert werden, so daß jetzt eine resultierende äußere Wirkung entsteht.

Im Turmalin und in anderen pyroelektrischen Krystallen besteht wahrscheinlich ein Zustand von elektrischer Polarität, welche von der Temperatur abhängt und zu ihrer Erzeugung keine äußere elektromotorische Kraft braucht. Wenn das Innere eines Körpers in einem Zustande permanenter elektrischer Polarisation wäre, dann würde die Oberfläche allmählich in solcher Weise geladen werden, daß sie die Wirkung der inneren Elektrisierung für alle Punkte außerhalb des Körpers neutralisiert. Diese äußere Oberflächenladung könnte durch keine von den gewöhnlichen Prüfungen entdeckt werden und könnte auch nicht durch eine von den gewöhnlichen Methoden, um Oberflächenelektrisierung zu entfernen, entfernt werden. Die innere Polarisation der Substanz würde daher nie entdeckt werden, außer durch derartige Mittel, wie Temperaturerhöhung, durch welche die Größe der inneren Polarisation vermehrt oder vermindert werden könnte. Die äußere Elektrisierung würde dann nicht länger im Stande sein, die äußere Wirkung der inneren Polarisation zu neutralisieren, und man würde eine freie Elektrisierung beobachten, ganz wie im Falle des Turmalins.

Das elektrische Glimmlicht.

142. Es läßt sich durch die mathematische Theorie der Elektrizität beweisen, daß, wenn ein Leiter, der eine scharfe Spitze auf seiner Oberfläche hat, in ein vollkommen isolierendes Medium gebracht und elektrisiert wird, daß dann die Oberflächendichtigkeit der Elektrizität bis ins Unendliche wachsen wird, je näher man an die Spitze herangehen würde, so daß an der Spitze selbst die Oberflächendichtigkeit und daher die elektromotorische Kraft unendlich groß sein würde. Aber dieses Resultat hängt von der Hypothese ab, daß die Luft oder das andere umgebende Dielektrikum ein unüberwindliches Isolationsvermögen hat, was nicht der Fall ist. Sobald daher die elektromotorische Kraft an der Spitze einen gewissen Grenzwert erreicht, giebt das Isolierungsvermögen der Luft nach und es findet eine disruptive Entladung der Elektrizität in der Luft statt. Eine kleine Menge Luft um die Spitze herum wird also elektrisch. Das elektrische System besteht nun aus dem metallischen Leiter mit seiner konischen Spitze, zusammen mit einer kugeligen Masse elektrisierter Luft,

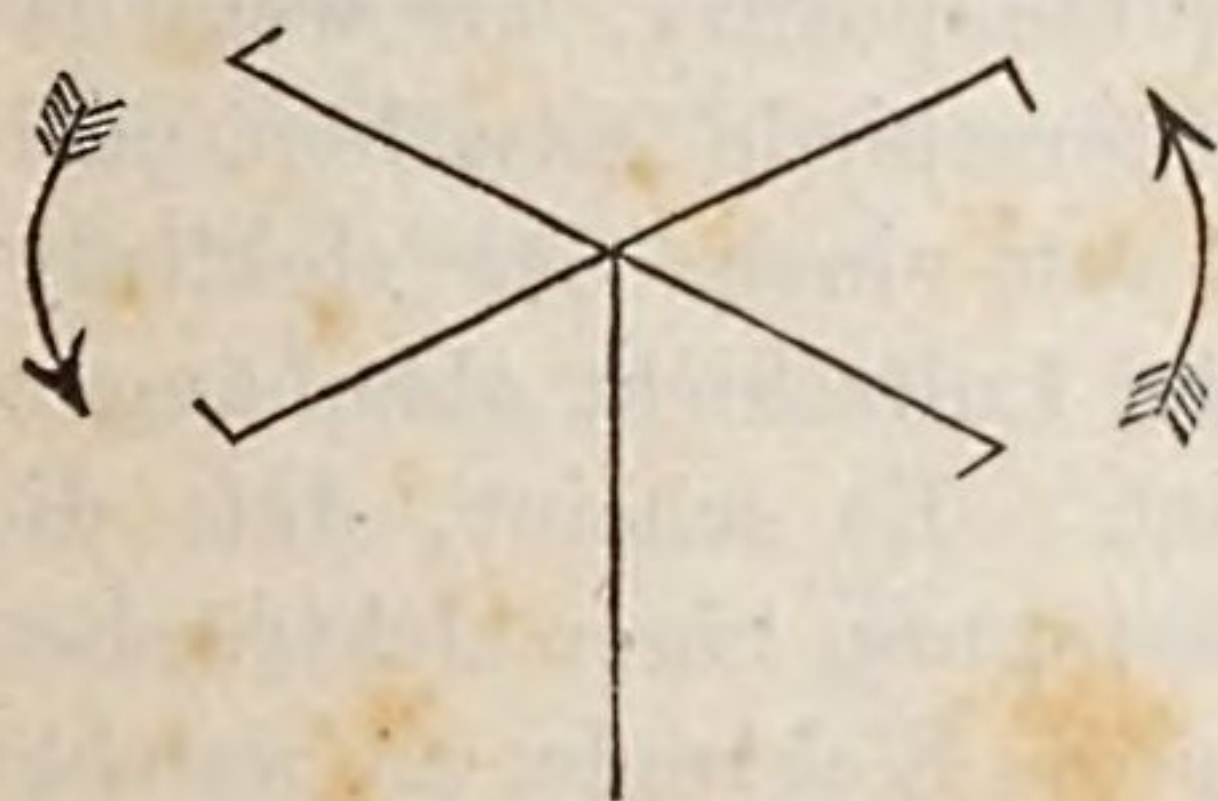
welche die Spitze umgiebt und wie eine Art Hülle um ihn wirkt, so daß die Grenzfläche des elektrischen Systems nicht mehr eine Spitze hat.

Dieses elektrische System würde, wenn es fest wäre, seine Ladung behalten, denn die elektromotorische Kraft ist an keinem Punkte groß genug, um disruptive Entladung hervorzubringen; da aber die Luft eine Flüssigkeit ist und da die elektromotorische Kraft am größten in der Verlängerung der Spitze ist, so bewegen sich die elektrisierten Teilchen der Luft in dieser Richtung fort. Wenn sie fort sind, so treten neue unelektrische Teilchen an ihre Stelle um die Spitze herum und da die Spitze nicht mehr von elektrisierter Luft bedeckt ist, so findet eine neue Entladung statt, wie zuerst.

So wird ein beständiges Zuströmen von ungeladenen Teilchen nach der Spitze hin stattfinden, ferner eine leuchtende Entladung der Elektrizität von der Spitze aus, welche man elektrisches Glimmlicht nennt, und endlich ein Strömen der geladenen Teilchen in der Richtung der Verlängerung der Achse der Spitze; diese Strömung nennt man elektrischen Wind. Wenn wir das Zuströmen der Luft von der Seite der Spitze hemmen, können wir das Glimmlicht schwach machen, und verstärken wir den Luftstrom durch Blasen, so machen wir das Glimmlicht stärker.

143. Den elektrischen Wind, welcher von der Spitze aus weht, kann man zum Treiben einer kleinen Windmühle benutzen, oder wenn der Leiter aus zwei gekreuzten Drähten besteht, deren zugespitzte

Fig. 32.



Enden rückwärts gebogen sind, wie in Fig. 32, und wenn er so aufgesetzt ist, daß er im Stande ist, sich zu drehen, so wird die Reaktion des elektrischen Windes das Kreuz in Richtung der Pfeile rotieren machen.

Nur ganz nahe an der elektrischen Spitze wird die Bewegung der elektrisierten Luft in gewissem Grade durch ihre Elektrisierung beeinflusst. In kurzer Entfernung von der Spitze mischt sich die elektrisierte Luft mit der andern und wird durch die gewöhnlichen Strömungen der Atmosphäre als eine unsichtbare elektrische Wolke weggeführt.

Wenn wir die Kraft berechnen, welche von der Elektrisierung einer großen Luftmasse in beträchtlicher Entfernung von anderen elektrischen Körpern herrührt, so werden wir finden, daß diese Kraft nicht im Stande ist, auf die Bewegung einer so großen Masse eine Einwirkung auszuüben, die vergleichbar wäre mit der von einer unbedeutenden Änderung der Dichte herrührenden oder aus anderen Ursachen resultierenden, welche die Bewegungen der Atmosphäre hervorrufen. Daher rührt die Bewegung der Gewitterwolken hauptsäch-

lich von atmosphärischen Strömungen her und wird nicht merklich durch ihre Elektrisierung beeinflusst.

144. Wenn eine elektrisierte Luftmasse in die Nähe der Oberfläche eines Leiters kommt, so induziert sie auf dieser Oberfläche eine der ihrigen entgegengesetzte Elektrisierung und wird an die Oberfläche herangezogen, aber da die elektromotorische Kraft klein ist, so können die elektrisierten Teilchen eine Zeit lang in der Nachbarschaft des Leiters bleiben, ohne in Berührung mit ihm zu kommen und dadurch entladen zu werden.

Um die Anwesenheit dieser elektrischen Atmosphäre, die einem Leiter anhaftet, zu entdecken, brauchen wir nur den Leiter zu isolieren und mit einem Elektrometer zu verbinden. Wenn wir jetzt die elektrisierte Luft von seiner Oberfläche wegblasen, so wird das Elektrometer die Elektrisierung des Leiters selbst anzeigen, welche natürlich von entgegengesetzter Art ist als die der elektrisierten Luft selbst. Ebenso wenn wir einen hohlen Metallcylinder in der Hand über eine elektrische Spitze halten, so können wir die Luft in ihm elektrisieren. Wenn wir dann den Cylinder auf ein isoliertes, mit dem Elektrometer verbundenes Gestell bringen, so wird das Elektrometer auf Null bleiben, bis die elektrisierte Luft heraus ist, was man erreichen kann, indem man Luft durch den Cylinder bläst. Das Elektrometer wird dann die Elektrisierung des Cylinders anzeigen, welche von entgegengesetzter Art ist, als die der elektrisierten Luft.

145. Das Glimmlicht bildet sich leichter in verdünnter Luft, als in dichter Luft, und leichter, wenn die Spitze positiv, als wenn sie negativ ist. Dieser und einige andere Unterschiede zwischen positiver und negativer Elektrizität scheinen von einem der elektrolytischen Polarisation analogen Zustande in der Luftschicht abzuhängen, welche mit der Elektrode in Berührung ist. Es scheint, daß die elektromotorische Kraft, welche zur Hervorbringung einer elektrischen Entladung nötig ist, etwas kleiner ist, wenn die Elektrode, an welcher die Entladung beginnt, die negative ist, daß aber die jedesmal entladene Elektrizitätsmenge am größten ist, wenn die Elektrode, an welcher die Entladung beginnt, positiv ist.

146. Eine feine Spitze kann an Stelle eines Probescheibchens angewendet werden, um die Natur der Elektrizität auf einem Teile der Oberfläche eines Leiters zu bestimmen, wenn auf ihm Elektrizität in Gegenwart eines andern elektrischen Körpers induziert wird. Zu diesem Zwecke wird die Spitze so an dem Leiter befestigt, daß sie einige Millimeter über seine Oberfläche hinausragt. Wird der Teil der Oberfläche, an welchem die Spitze befestigt ist, positiv elektrisiert, so giebt die Spitze positive Elektrizität an die Luft ab und der Leiter verliert positive oder gewinnt negative Elektrizität. Dies kann man prüfen, indem man entweder den induzierenden Körper entfernt oder

entladet und die Art der Ladung des induzierten Körpers bestimmt, oder indem man den induzierten Körper mit dem Elektrometer verbindet und die Änderung des Potentials beobachtet, wenn die Spitze ihre Elektrizität ausströmen läßt.

Man hat gefunden, daß einige Pflanzendorne, Spitzen und Stacheln viel vollkommener die Elektrizität zum Ausströmen bringen als die am feinsten zugespitzten Nadeln, welche wir verfertigen können.

Die Wirkung der Spitze kann unterstützt werden, wenn man Luft durch eine Röhre über die Spitze bläst, und auf diese Weise kann man verhindern, daß die elektrisierte Luft sich selbst an der Oberfläche des Induktors entladet.

Das elektrische Büschellicht.

147. Das elektrische Büschellicht ist eine Erscheinung, welche man durch Elektrisierung einer abgerundeten Spitze oder einer kleinen Kugel in Luft hervorbringen kann, so daß ein elektrisches Feld entsteht, in welchem die Spannung um so kleiner wird, je mehr die Entfernung von der Kugel wächst, aber nicht so rapide, wie in dem Falle einer scharfen Spitze. Das Büschellicht besteht aus einer Aufeinanderfolge von Entladungen, die sich verzweigen, sowie sie aus der Kugel in die Luft übergehen und die entweder an geladenen Teilchen der Luft enden, oder an anderen Leitern, wenn sie sie erreichen. Die Büschelentladung bringt einen Schall hervor, dessen Höhe von dem Intervall der aufeinander folgenden Entladungen abhängt. Eine Luftströmung, wie in dem Falle des Glimmlichts, findet nicht statt.

Der elektrische Funke.

148. Wenn die Spannung in dem Raume zwischen den beiden Elektroden überall zwischen ihnen beträchtlich ist, wie in dem Falle, wo zwei Kugeln in einer Entfernung von einer stehen, die nicht sehr groß gegen ihre Radien ist, dann nimmt die Entladung, wenn sie eintritt, gewöhnlich die Form eines Funkens an, durch welchen nahezu die ganze Elektrizität auf einmal entladen wird.

Wenn in diesem Falle ein Teil des Dielektrikums nachgegeben hat, so kommt der ihm in der Richtung der elektrischen Kraft benachbarte Teil in einen Zustand größerer Spannung, so daß er auch nachgibt, und so geht die Entladung gerade durch das Dielektrikum hindurch weiter. Wir können das allmähliche Reißen des Dielektrikums mit der Erscheinung vergleichen, welche man erhält, wenn man einen kleinen Riss in ein Blatt Papier senkrecht zu dem Rande macht und

dann auf das Papier in der Richtung des Randes einen Zug ausübt. Das Papier wird durchgerissen, und zwar fängt es bei dem kleinen Riss an, geht aber hierhin und dorthin weiter und nimmt die schwachen Stellen in dem Papier auf. Ebenso beginnt der elektrische Funke an dem Punkte, wo die elektrische Spannung zuerst die elektrische Festigkeit des Dielektrikums überwindet und geht von diesem Punkte aus in einem unregelmässigen Wege weiter, je nachdem er auf andere schwache Punkte trifft, z. B. auf Staubteilchen, die in der Luft schweben.

149. Die Untersuchung der Erscheinungen der leuchtenden elektrischen Entladung ist durch die Anwendung des Spektroskops sehr gefördert worden. Man läßt das Licht des Funkens oder einer andern Entladung auf den Spalt im Kollimatorrohr des Spektroskops fallen und beobachtet es, nachdem es durch die Prismen zerlegt ist, durch das Fernrohr. Das so zerlegte Licht besteht, wie man findet, aus einer grossen Anzahl von breiten Linien und Banden, die das sogenannte Spektrum des elektrischen Funkens bilden. Vergleicht man Funken von verschiedenen Quellen, so findet man, daß diese breiten Linien in Gruppen geteilt werden können, von denen jede von der Anwesenheit einer speziellen Substanz in dem Medium herrührt, durch welches die Entladung stattfindet.

Benutzen wir die von Lockyer eingeführte Methode, daß wir mittels einer Linse ein Bild des Funkens auf den Spalt werfen, so können wir auf einen Blick eine Vergleichung der Konstituenten des Mediums erhalten, welche durch die elektrische Entladung auf den verschiedenen Punkten ihres Weges leuchtend werden. Nahe an jeder Elektrode rühren die Linien hauptsächlich von dem Metall oder den Metallen her, aus welchen diese Elektrode besteht. In grösseren Entfernungen werden diese Linien schwächer, dünner und weniger zahlreich, aber das Spektrum des Gases, durch welches die Entladung stattfindet, bleibt sichtbar.

Einige der von Metallen herrührenden Linien sind weiter als andere sichtbar, was beweist, daß sie von dem Funken an Stellen gebildet werden können, wo andere nicht mehr sichtbar sind, entweder weil die Dichte des metallischen Dampfes oder weil die Stärke der elektrischen Störung nicht gross genug ist. Man sieht so, daß die elektrische Entladung eine ganz ansehnliche Menge Stoff selbst von den härtesten Metallen reißt und die Teilchen durch die Luft bis zu einer Entfernung von einigen Millimetern von der Oberfläche des Metalls wegführt. Man sieht auch aus einer Vergleichung der Funken von verschiedenen Elektroden und in verschiedenen Gasen, daß kein Teil des Lichtes von einem in allen verschiedenen Fällen gemeinsamen Stoff ausgesendet wird, sondern daß jede Linie von dem einen oder dem anderen der vorhandenen Stoffe herrührt.

Daraus folgt, daß weder das elektrische Fluidum, wenn es eine solche Substanz gibt, noch irgend ein ätherisches Medium, welches alle gewöhnliche Materie durchdringen soll, während der Entladung leuchtend wird; denn wenn das der Fall wäre, so müßte dessen Spektrum bei allen Entladungen sichtbar sein.

Über stationäre Ströme.

150. In dem Falle, dass ein Strom zwischen zwei isolierten Leitern von verschiedenem Potential fließt, ist der Vorgang rasch zu Ende, da die Potentiale der beiden Körper sich bald ausgleichen, und der Strom ist daher wesentlich ein vorübergehender Strom.

Es gibt aber Methoden, durch welche die Potentialdifferenz der Leiter konstant erhalten werden kann; in diesem Falle wird der Strom mit gleichmäßiger Stärke als stationärer Strom zu fließen fortfahren.

Die Volta'sche Batterie.

Die bequemste Methode, einen stationären Strom hervorzubringen, ist die Anwendung einer Volta'schen Batterie.

Der Deutlichkeit halber wollen wir das Daniellsche konstante Element beschreiben.

Eine Lösung von Zinksulfat befindet sich in einer Zelle von porösem Thon und diese Zelle steht in einem Glase, das eine gesättigte Lösung von Kupfervitriol enthält. Ein Stück Zink taucht in das Zinksulfat und ein Stück Kupfer in das Kupfersulfat. Drähte sind an dem Zink und dem Kupfer oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche angelötet. Diese Kombination heißt eine Zelle oder ein Element einer Daniellschen Batterie, S. Art. 193.

151. Wenn die Zelle isoliert ist, indem sie auf eine nicht leitende Unterlage gestellt wird, und wenn der mit dem Kupfer verbundene Draht mit einem isolierten Leiter *A* in Berührung gesetzt wird, und der mit dem Zink verbundene Draht mit *B*, einem anderen isolierten Leiter aus demselben Metall wie *A*, in Berührung ist, dann kann man durch ein feines Elektrometer zeigen, daß das Potential von *A* dasjenige von *B* um eine gewisse Größe übertrifft. Diese Potentialdifferenz nennt man die elektromotorische Kraft des Daniellschen Elements.

Wenn jetzt *A* und *B* von dem Element getrennt werden und durch einen Draht mit einander in Verbindung gesetzt werden, so geht ein vorübergehender Strom durch den Draht von *A* nach *B* und die Potentiale von *A* und *B* werden gleich. *A* und *B* können dann

wieder durch das Element geladen werden und der Prozeß so lange wiederholt werden, als das Element wirkt. Wenn aber *A* und *B* durch einen Draht *C* mit einander verbunden werden, und wenn sie zugleich auch mit der Batterie, wie früher, verbunden sind, so wird das Element einen konstanten Strom durch *C* hindurch und eine konstante Potentialdifferenz zwischen *A* und *B* hervorbringen. Diese Differenz wird nicht, wie wir sehen werden, gleich der ganzen elektromotorischen Kraft des Elements sein; denn ein Teil dieser Kraft wird dazu verwendet, um den Strom durch das Element selbst dauernd zu erhalten.

Bringt man eine Anzahl von Elementen in eine Reihe, so daß das Zink des ersten Elements metallisch mit dem Kupfer des zweiten und so fort verbunden ist, so heißt dies eine Volta'sche Batterie. Die elektromotorische Kraft einer solchen Batterie ist die Summe der elektromotorischen Kräfte der Elemente, aus welchen sie zusammengesetzt ist.

Wenn die Batterie isoliert ist, so kann sie als Ganzes mit Elektrizität geladen werden, aber das Potential des Kupferendes wird immer das des Zinkendes um die elektromotorische Kraft der Batterie übertreffen, welches auch der absolute Wert dieser Potentiale sein mag. Die Elemente der Batterie können sehr verschiedene Einrichtung haben, sie können verschiedene chemische Substanzen und verschiedene Metalle enthalten, falls sie nur so beschaffen sind, daß keine chemische Aktion vor sich geht, ohne daß ein Strom durchgeht.

152. Betrachten wir nun eine Voltasche Batterie, deren Enden von einander isoliert sind. Das Kupferende wird positiv elektrisch sein oder Glaselektrizität haben, das Zinkende wird negativ elektrisch sein oder Harzelektrizität haben.

Nun mögen die beiden Enden der Batterie mittels eines Drahtes verbunden werden. Ein elektrischer Strom wird entstehen und wird in einer sehr kurzen Zeit einen konstanten Wert erreichen. Man sagt dann, es sei ein stationärer Strom.

Magnetische Wirkung des Stromes.

153. Oerstedt entdeckte, daß ein Magnet in der Nähe eines geraden elektrischen Stromes sich von selbst rechtwinkelig zu der Ebene zu stellen sucht, die durch den Magneten und den Strom geht.

Wenn sich ein Mensch in die Linie des Stromes so legen würde, daß der Strom vom Kupfer durch den Draht zum Zink von seinem Kopf zu seinen Füßen fließen würde, und wenn er dabei sein Gesicht gegen den Mittelpunkt des Magneten gerichtet hätte, so würde dasjenige Ende des Magneten, welches für gewöhnlich nach Norden zu zeigen strebt, jetzt, wenn der Strom fließt, nach der rechten Hand des Men-

schen zu zeigen streben. Wir sehen so, daß der elektrische Strom magnetische Wirkungen ausübt, welche außerhalb des Stromes stattfinden, und durch welche seine Existenz bestimmt und seine Intensität gemessen werden kann, ohne daß man den Stromkreis unterbricht oder sonst irgend etwas in den Strom selbst hineinbringt.

Die GröÙe der magnetischen Wirkung ist, wie man festgestellt hat, genau proportional der Stärke des Stromes, wenn sie durch die Produkte der Elektrolyse in einem Voltameter gemessen wird, und ferner ist diese GröÙe der magnetischen Wirkung ganz unabhängig von der Natur des Leiters, in welchem der Strom fließt, ob das nun ein Metall oder ein Elektrolyt sei.

154. Ein Instrument, welches die Stärke eines elektrischen Stromes durch seine magnetische Wirkung mißt, heißt ein Galvanometer.

Galvanometer im allgemeinen bestehen aus einer oder mehreren Windungen von mit Seide besponnenem Draht, innerhalb welcher ein Magnet mit horizontaler Achse hängt. Wenn ein Strom durch den Draht fließt, so strebt der Magnet sich von selbst mit seiner Achse senkrecht gegen die Ebene der Windungen zu stellen. Nehmen wir an, daß die Ebene der Windungen parallel der Ebene des Erdäquators ist und daß der Strom durch die Windungen von Osten nach Westen in der Richtung der scheinbaren Bewegung der Sonne fließt, dann wird der Magnet innerhalb der Windungen sich von selbst mit seiner magnetischen Achse in dieselbe Richtung zu stellen suchen, welche die magnetische Achse der Erde hat, wenn man diese als einen großen Magnet betrachtet, deren Nordpol ebenso magnetisch ist wie dasjenige Ende einer Kompaßnadel, welches nach Süden zeigt.

Das Galvanometer ist das bequemste Instrument, um die Stärke von elektrischen Strömen zu messen. Wir wollen daher annehmen, daß es möglich ist, ein solches Instrument zu konstruieren, und mit dieser Annahme die Gesetze dieser Ströme zu studieren, und wenn wir sagen, daß ein elektrischer Strom eine gewisse Stärke hat, so nehmen wir an, daß die Messung mit einem Galvanometer ausgeführt wurde.

Über Systeme von linearen Leitern.

155. Jeder Leiter kann als ein linearer Leiter behandelt werden, wenn er so eingerichtet ist, daß der Strom immer in derselben Weise zwischen zwei Teilen seiner Oberfläche übergehen muß, welche seine Elektroden heißen. Zum Beispiel eine Metallmasse von beliebiger Gestalt, deren Oberfläche ganz, mit Ausnahme von zwei Stellen, mit isolierendem Material bedeckt ist und bei der die freie Oberfläche an

diesen beiden Stellen in metallischem Kontakt mit zwei aus vollkommen leitendem Stoff bestehenden Elektroden ist, eine solche Metallmasse kann als ein linearer Leiter betrachtet werden. Denn wenn man den Strom an der einen dieser Elektroden eintreten, an der andern austreten läßt, so werden die Stromlinien bestimmt sein und die Beziehung zwischen elektromotorischer Kraft, Strom und Widerstand wird durch das Ohmsche Gesetz ausgedrückt sein; denn der Strom in jedem Teile der Masse wird eine lineare Funktion von E sein. Wenn es hingegen mehr als zwei mögliche Elektroden gibt, so kann der Leiter auf mehr als eine Art den Strom leiten.

Das Ohmsche Gesetz.

156. Es sei E die elektromotorische Kraft in einem linearen Leiter von der Elektrode A_1 zur Elektrode A_2 (S. Art. 5). Es sei C die Stärke des elektrischen Stromes in dem Leiter, das heißt, C Einheiten Elektrizität gehen in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt in der Richtung $A_1 A_2$, und es sei R der Widerstand des Leiters, dann ist der Ausdruck des Ohmschen Gesetzes

$$E = CR \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Der Widerstand eines Leiters ist definiert als das Verhältniß der elektromotorischen Kraft zu der Stromstärke, welche sie hervorbringt. Die Einführung dieses Ausdrucks würde ohne wissenschaftlichen Wert gewesen sein, wenn nicht Ohm gezeigt hätte, was er experimentell that, daß der Ausdruck einer reellen physikalischen GröÙe entspricht, d. h. daß er einen bestimmten Wert hat, welcher sich nur ändert, wenn sich die Beschaffenheit des Leiters ändert.

Erstens also ist der Widerstand des Leiters unabhängig von der Stärke des Stromes, welcher durch ihn fließt.

Zweitens ist der Widerstand unabhängig von dem elektrischen Potential, auf welchem der Leiter gehalten wird und von der Dichtigkeit der Elektrizitätsverteilung auf der Oberfläche des Leiters.

Der Widerstand hängt ganz von der Natur des Stoffes ab, aus welchem der Leiter besteht, von dem Kohäsionszustande seiner Teile und von seiner Temperatur.

Der Widerstand eines Leiters kann bis auf ein Zehntausendstel oder sogar ein Hunderttausendstel seines Wertes gemessen werden, und es wurden so viele Leiter untersucht, daß unsere Überzeugung von der Richtigkeit des Ohmschen Gesetzes jetzt eine sehr begründete ist ¹⁾.

¹⁾ S. Report of British Association, 1876.

Lineare Leiter hintereinander gereiht.

157. Es seien A_1, A_2 die Elektroden des ersten Leiters und der zweite Leiter sei mit einer seiner Elektroden in Kontakt mit A_2 gebracht, so daß der zweite Leiter als Elektroden A_2, A_3 hat. Die Elektroden des dritten Leiters seien mit A_3 und A_4 bezeichnet.

Die elektromotorische Kraft auf jedem dieser Leiter sei mit E_{12}, E_{13}, E_{34} und so fort für die anderen Leiter bezeichnet.

Der Widerstand der Leiter sei

$$R_{12}, \quad R_{23}, \quad R_{34} \text{ u. s. w.}$$

Dann haben wir, da die Leiter in Reihen geordnet sind, so daß derselbe Strom C durch jeden fließt, nach dem Ohmschen Gesetze

$$E_{12} = CR_{12}, \quad E_{23} = CR_{23}, \quad E_{34} = CR_{34} \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Wenn E die resultierende gesamte elektromotorische Kraft und R der resultierende Gesamtwiderstand des Systems ist, so müssen wir nach dem Ohmschen Gesetz haben

$$E = CR \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Nun ist

$$E = E_{12} + E_{23} + E_{34} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

die Summe der einzelnen elektromotorischen Kräfte nach Gleichung (2)

$$= C(R_{12} + R_{23} + R_{34}).$$

Vergleichen wir dieses Resultat mit (3), so finden wir

$$R = R_{12} + R_{23} + R_{34} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Oder, der Widerstand einer Reihe von Leitern ist die Summe der Widerstände der einzelnen Leiter.

Potential an einem Punkte des unverzweigten Leiters.

Es seien A und C die Elektroden des Leiters, B ein Punkt zwischen ihnen, a, c und b die Potentiale dieser drei Punkte respektive. Es sei R_1 der Widerstand des Teiles von A bis B , R_2 der des Teiles von B nach C und R der Widerstand der ganzen Reihe von A nach C , dann ist, da

$$a - b = R_1 C, \quad b - c = R_2 C \text{ und } a - c = RC$$

ist, das Potential in B

$$b = \frac{R_2 a + R_1 c}{R} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

woraus das Potential in B zu bestimmen ist, wenn die Potentiale von A und C gegeben sind.

Widerstand eines verzweigten Leiters.

158. Es seien eine Anzahl von Leitern ABZ , ACZ , ADZ nebeneinander gelegen, so daß ihre Endpunkte mit denselben beiden Punkten A und Z in Verbindung sind. Man sagt dann, sie bilden einen verzweigten Kreis.

Die Widerstände dieser Leiter seien beziehlich R_1 , R_2 , R_3 und die Stromstärken C_1 , C_2 , C_3 , der Widerstand des verzweigten Leiters sei R und der gesamte Strom C . Da die Potentiale in A und Z für alle Leiter dieselben sind, so haben sie dieselbe Differenz, welche wir E nennen wollen. Wir haben dann

$$E = C_1 R_1 = C_2 R_2 = C_3 R_3 = CR,$$

aber es ist

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

also

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (7)$$

Oder: Der reciproke Widerstand eines verzweigten Leiters ist die Summe der reciproken Widerstände der komponierenden Leiter.

Wenn wir das Reciproke des Widerstandes eines Leiters die Leitungsfähigkeit desselben nennen, dann können wir sagen, daß die Leitungsfähigkeit eines verzweigten Leiters gleich der Summe der Leitungsfähigkeiten der komponierenden Leiter ist.

Der Strom in einem Zweige eines verzweigten Leiters.

Aus den Gleichungen des vorhergehenden Artikels sieht man, daß, wenn C_1 die Stromstärke in einem Zweige des verzweigten Leiters ist und R_1 der Widerstand dieses Zweiges, daß dann

$$C_1 = C \frac{R}{R_1} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (8)$$

ist, wo C der gesamte Strom und R der Widerstand des verzweigten Leiters ist, wie er vorher bestimmt wurde.

Kirchhoff hat die Gesetze eines linearen Systems in folgender Weise ausgedrückt, wobei das Potential in der Betrachtung nicht gebraucht wird.

1) (Gleichung der Kontinuität.) An jedem Punkte des Systems ist die Summe aller Ströme, welche zu diesem Punkte hinfließen, Null.

2) In einem geschlossenen, von den Leitern gebildeten Kreise ist die Summe der elektromotorischen Kräfte im ganzen Kreise gleich der Summe der Produkte aus den Stromstärken in jedem Leiter, multipliziert mit dem Widerstande dieses Leiters.

Längswiderstand von Leitern von gleichförmigem Querschnitt.

159. Es sei ϱ der Widerstand eines Würfels von einem gegebenen Material gegen einen Strom, der parallel einer seiner Kanten läuft, die Kanten des Würfels seien die Längeneinheit, dann wird ϱ der „spezifische Widerstand dieses Stoffes für die Volumeinheit“ genannt.

Betrachten wir weiter einen prismatischen Leiter von demselben Stoffe, dessen Länge l und dessen Querschnitt die Einheit ist. Dieser ist äquivalent mit l in eine Reihe geordneter Würfel. Der Widerstand des Leiters ist daher $l\varrho$.

Endlich betrachten wir einen Leiter von der Länge l und dem gleichförmigen Querschnitt s . Dieser ist äquivalent mit s Leitern, wie der letzte, die in einem verzweigten Kreise angeordnet sind. Der Widerstand dieses Leiters ist daher

$$R = \frac{l\varrho}{s}.$$

Kennen wir den Widerstand eines gleichmäÙig dicken Drahtes, so können wir den spezifischen Widerstand des Materials, aus dem er gemacht ist, bestimmen, wenn wir seine Länge und seinen Querschnitt bestimmen können.

Die GröÙe des Querschnittes von dünnen Drähten wird meistens genau durch Rechnung aus der Länge, dem Gewicht und spezifischen Gewicht einer Probe bestimmt. Die Bestimmung des spezifischen Gewichts ist zuweilen etwas unbequem und in solchen Fällen braucht man den Widerstand eines Drahtes von der Längeneinheit und der Masseneinheit als den „spezifischen Widerstand für die Gewichtseinheit“.

Wenn r dieser Widerstand, l die Länge und m die Masse eines Drahtes ist, so ist

$$R = \frac{l^2 r}{m}.$$

Zehntes Kapitel.

Erscheinungen, die ein elektrischer Strom zeigt, wenn er durch heterogene Medien fließt.

1. Thermoelektrische Erscheinungen.

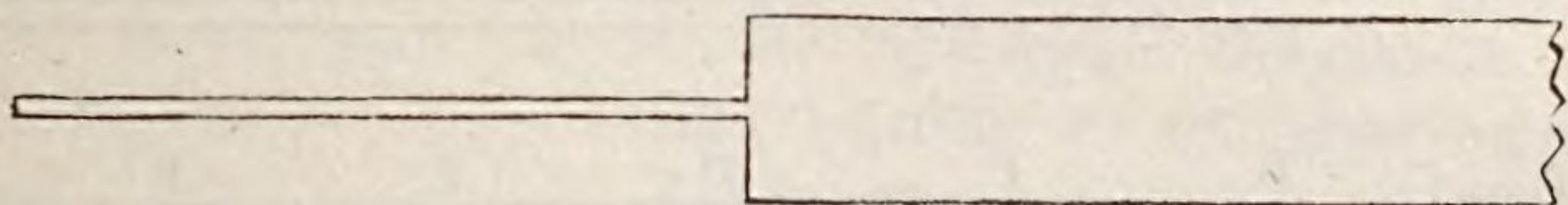
160. Seebeck entdeckte im Jahre 1822, daß, wenn ein Kreis aus zwei verschiedenen Metallen gebildet wird und die beiden Verbindungsstellen der Metalle auf verschiedenen Temperaturen gehalten werden, daß dann ein elektrischer Strom durch den Kreis fließt. Wenn die beiden Metalle Eisen und Kupfer bei Temperaturen unter 280°C . sind, so fließt der Strom vom Kupfer zum Eisen durch die wärmere Verbindungsstelle. Es ist also im Allgemeinen eine elektromotorische Kraft vorhanden, die in bestimmter Richtung in dem Kreise wirkt, sobald die beiden Verbindungsstellen auf verschiedenen Temperaturen sind.

In einem aus einer Anzahl von Metallen gebildeten Kreise, in dem überall dieselbe Temperatur herrscht, kann kein Strom existieren. Denn wenn ein Strom vorhanden wäre, so könnte er beständig dazu benutzt werden, eine Maschine zu treiben oder Wärme in einem Leiter zu erzeugen und zwar, ohne daß dem System irgend welche Energie von außen zugeführt wird; denn um den Kreis auf konstanter Temperatur zu halten, ist nichts erforderlich, außer daß man verhindert, daß Wärme ein- oder austritt. Bei einer gegebenen Temperatur muß daher die elektromotorische Kraft in einem Kreise von drei Metallen A, B, C für den ganzen Kreis Null sein. Wenn daher die elektromotorische Kraft von C nach A gleich a ist, die von C nach B gleich b und die von B gegen A gleich x ist, dann ist in dem Stromkreise ABC die gesamte elektromotorische Kraft $a - b - x = 0$, so daß x ,

die elektromotorische Kraft von B gegen A , durch $a - b$ dargestellt wird, wo a und b Gröſsen sind, die durch die Beobachtung der elektromotorischen Kraft von einem dritten Metall C gegen die Metalle A und B bestimmt sind. Wir können dies ausdrücken, wenn wir sagen, daß die Gröſsen a und b die Potentiale der Metalle A und B in Bezug auf ein drittes Metall C bei der gegebenen Temperatur sind. Das Potential von A in Bezug auf B ist dann $a - b$. Die wirkliche Bestimmung der relativen Potentiale der Metalle wird in Art. 182 erläutert werden.

161. Es wurde von Magnus¹⁾ gezeigt, daß, wenn ein Kreis aus einem einzigen Metalle gebildet wird, kein Strom in ihm entsteht, wenn auch die Temperatur und der Querschnitt des leitenden Kreises an verschiedenen Stellen verschieden ist. Da in diesem Falle notwendig Wärmeleitung und in Folge dessen Zerstreuung der Energie eintritt, so können wir nicht, wie in dem früheren Falle, das Resultat als selbstverständlich ansehen. Die elektromotorische Kraft zwischen zwei auf gegebenen Temperaturen befindlichen Teilen des Stromkreises könnte zum Beispiel von ihrer Entfernung oder von der Art der Änderung des Querschnittes in dem zwischenliegenden Teile des Kreises abhängen. In der That haben die Experimente von Le Roux und Anderen gezeigt, daß das Gesetz von Magnus nicht mehr auf einen Kreis anzuwenden ist, in welchem eine sehr plötzliche Temperaturänderung stattfindet, wie z. B. in dem Augenblicke, wenn der Stromkreis dadurch geschlossen wird, daß man einen warmen Draht mit einem kalten Draht aus demselben Metalle in Berührung bringt. Auch ohne eine physi-

Fig. 33.



kalische Diskontinuität des Stromkreises, wie sie in der Berührung zweier einzelnen Drahtstücke enthalten ist, kann eine genügend plötzliche Änderung der Temperatur hervorgebracht werden, wenn man einen dicken Draht nimmt und ein Stück von ihm auszieht, bis es sehr dünn ist. Wenn die Verbindungsstelle des dicken und des dünnen Teiles in eine Flamme gebracht wird, so wird der dünne Teil sehr viel rapider erwärmt werden, als der dicke Teil, so daß die Änderung der Temperatur eine so plötzliche ist, daß das Gesetz von Magnus ungiltig ist, und wir einen Strom in einem Kreise aus einem Metalle erhalten; wir müssen daher das Magnussche Gesetz folgendermaßen abgeändert aussprechen:

¹⁾ Pogg. Ann., 1851.

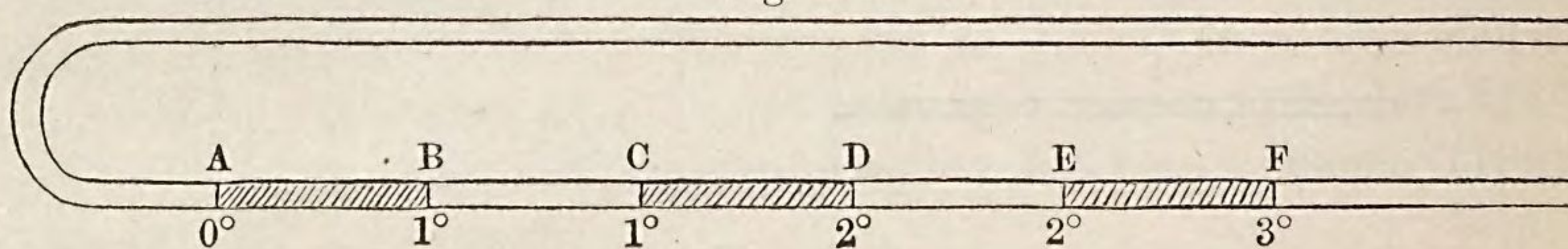
Die elektromotorische Kraft von einem Punkte eines Leiters aus homogenem Metall nach einem andern hängt von der Temperatur dieser Punkte ab, wenn in einem Teile des Leiters eine merkliche Temperaturverschiedenheit stattfindet zwischen Punkten, deren Entfernung innerhalb der Grenzen der molekularen Wirkung liegt.

Thermoelektrische Kraft eines Metalls bei gegebener Temperatur.

162. Betrachten wir jetzt einen linearen Kreis, der abwechselnd aus Stücken von zwei Metallen besteht, z. B. Blei und Eisen. Wir werden Blei als Normalmetall annehmen und die Eigenschaften des Eisens in Bezug auf Blei studieren.

In der Figur sind die Eisenstücke durch Schraffierung unterschieden. Die Temperaturen der Verbindungsstellen seien die in der Figur angegebenen, wobei die Temperaturen der beiden Enden jedes Eisenstückes sich um einen Grad unterscheiden, dagegen die Temperaturen der Enden jedes zwischenliegenden Stückes Blei einander gleich sind. Die gesamte elektromotorische Kraft in dem Kreise ist die Summe der elektromotorischen Kräfte, die von der thermoelektrischen Wirkung der verschiedenen Paare von Verbindungsstellen herrühren. Wenn wir nun die Paare *A* und *B*, *C* und *D*, *E* und *F*

Fig. 34.

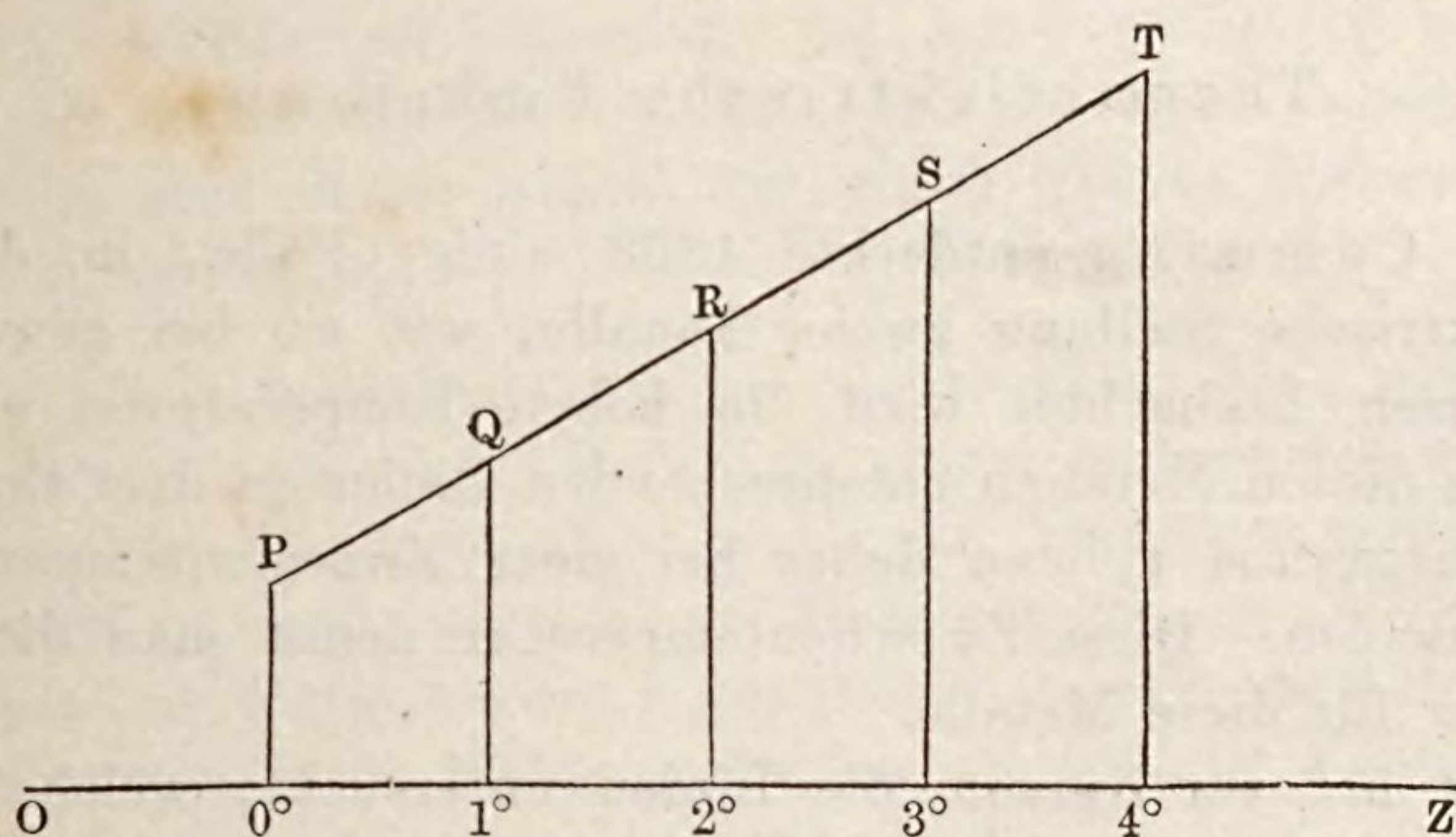


betrachten, die zu den Eisenstücken gehören, so finden wir, daß die Temperatur in jedem Stücke um einen Grad steigt, wenn wir aber die Paare *B* und *C*, *D* und *E* nehmen, die zu den Bleistücken gehören, so ist die Temperatur in jedem Stücke gleichförmig und daher ist in diesen Stücken keine elektromotorische Kraft vorhanden. Wir können daher die zwischenliegenden Stücke von Blei außer Rechnung lassen und die elektromotorische Kraft, die von den Verbindungsstellen *A* und *F* herrührt, als äquivalent betrachten mit der Summe der elektromotorischen Kräfte der Paare von Verbindungen *A* und *B*, *C* und *D*, *E* und *F*.

Wenn daher eine Figur konstruiert wird, in welcher auf der Achse *OZ* die Grade der Thermometerskala angegeben sind, und in welcher die Fläche $0^0 PQ 1^0$ die elektromotorische Kraft darstellt,

wenn die Verbindungsstellen auf 0° und 1° sind u. s. w., dann wird die elektromotorische Kraft, wenn die Verbindungsstellen auf beliebigen Temperaturen sind, durch die Fläche dargestellt werden, die von der Achse, den Ordinaten an den gegebenen Temperaturen und der Linie $PQRST$ eingeschlossen ist.

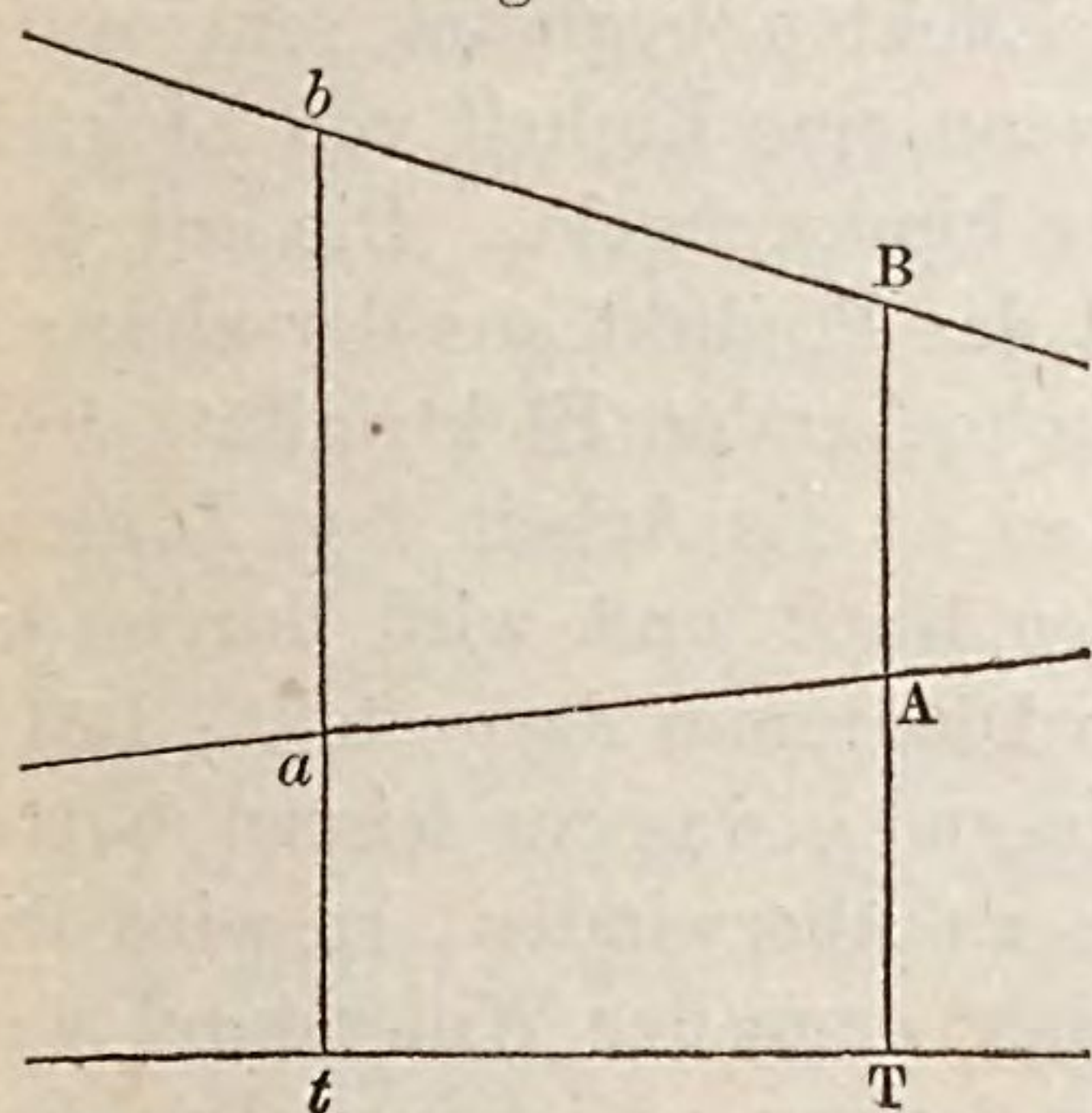
Fig. 35.



163. Jede Ordinate, wie z. B. $0^{\circ} P$, $1^{\circ} Q$, wird die thermoelektrische Kraft des Eisens gegen Blei bei 0° , 1° u. s. w. genannt, und wird positiv gerechnet, wenn für eine kleine Temperaturdifferenz der Strom von Blei zum Eisen durch die warme Verbindungsstelle geht.

Wir können auch in dieselbe Figur andere Linien einzeichnen, deren Ordinaten die thermoelektrischen Kräfte beliebiger anderer Metalle gegen Blei darstellen und die positiv gerechnet und nach oben gemessen werden, wenn für eine kleine Temperaturdifferenz der Strom vom Blei zum Metall durch die warme Verbindungsstelle fließt. Eine solche Figur nennt man ein thermoelektrisches Diagramm und aus

Fig. 36.



ihm können wir die elektromotorische Kraft ableiten, die zu einem beliebigen Paare von Metallen gehört, deren Verbindungsstellen auf gegebenen Temperaturen gehalten sind.

Wenn z. B. aA die Linie ist, die das Metall A repräsentiert und bB eine andere, die das Metall B repräsentiert und wenn t , T die Temperaturen der Verbindungsstellen sind, so wird die elektromotorische Kraft des Stromkreises durch die Fläche $ABbaA$ dargestellt, und die Kraft wirkt in der angezeigten Richtung, nämlich vom Metall A zum Metall B durch die warme Verbindungsstelle.

Wenn wir anstatt des Bleies ein anderes Metall als Normalmetall angenommen hätten, so würden die Diagramme in der Form geändert sein, aber alle in dem Diagramm gemessenen Flächen würden dieselben geblieben sein, da die Formänderung hervorgebracht wird durch eine gleitende Verschiebung aller Linien längs vertikaler Linien.

Thermoelektrische Umkehrung.

164. Cumming entdeckte 1823 einige Fälle, in denen die thermoelektrische Stellung zweier Metalle, wie sie bei gewöhnlichen Temperaturen beobachtet wird, in hohen Temperaturen umgekehrt wird. Die diesen Metallen entsprechenden Linien in dem thermoelektrischen Diagramm müssen daher bei einer Zwischentemperatur einander schneiden. Diese Zwischentemperatur nennt man die neutrale Temperatur für diese Metalle.

Tait hat vor Kurzem die Linien untersucht, welche eine beträchtliche Anzahl von Metallen in dem thermoelektrischen Diagramm darstellen, und er findet, daß sie für die meisten Metalle nahezu, wenn nicht genau gerade Linien sind. Die Linien für Eisen und Nickel dagegen haben beträchtliche Krümmungen, so daß sie die geraden Linien, die zu anderen Metallen gehören, in verschiedenen Punkten schneiden können, die dann verschiedenen neutralen Temperaturen entsprechen.

Thermische Wirkungen des Stromes.

165. Wendet man das Prinzip der Erhaltung der Energie auf den Fall eines thermoelektrischen Stromes an, so kann man leicht sehen, daß der Strom von thermischen Effekten begleitet sein muß.

Untersuchen wir, was stattfindet, wenn eine Einheit von Elektrizität durch einen Querschnitt des Kreises hindurchgeht. Die auf den elektrischen Strom verwendete Arbeit ist das Produkt aus der elektromotorischen Kraft in die Menge der durchgehenden Elektrizität, und da diese letztere GröÙe die Einheit ist, so ist die Arbeit dem Zahlenwerte nach gleich der elektromotorischen Kraft und wird durch die Fläche $ABba$ in dem thermoelektrischen Diagramm dargestellt. Läßt man den Strom fließen, ohne daß er irgend etwas zu leisten hatte, außer den Widerstand des Stromkreises zu überwinden, so wird die gesamte Arbeit in Wärme verwandelt, aber wenn der Widerstand von einem Teile des Stromkreises, z. B. eines langen und feinen Drahtes, den des thermoelektrischen Elements stark überwiegt, so wird die in diesem Teile des Stromkreises erzeugte Wärme weit die in dem thermoelektrischen Paare selbst erzeugte Wärme überwiegen. Anstatt

den Strom Wärme erzeugen zu lassen, können wir ihn eine magnet-elektrische Maschine treiben lassen und so einen bestimmten Teil der Arbeit in mechanische Arbeit umwandeln.

So wird für jede Elektrizitätseinheit, welche durchgeschickt wird, eine gewisse Menge Arbeit von den thermoelektrischen Kräften des Stromes geleistet. Die einzige Quelle dieser Arbeit ist die Wärme des thermoelektrischen Elements, und daher schliessen wir aus dem Prinzip der Erhaltung der Energie, daß in irgend einem Teile der Stromkreise eine dieser Arbeit dynamisch gleiche Wärmemenge verschwunden sein muß.

166. Nun fand Peltier¹⁾ im Jahre 1834, daß, wenn ein elektrischer Strom von einem Metall zu einem andern mit höherer thermoelektrischer Kraft gesendet wird, die Verbindungsstelle sich abkühlt, oder da keine permanente Änderung in den Metallen vor sich geht, daß ein Wärmeschwund stattfindet. Läßt man den Strom in der entgegengesetzten Richtung fließen, so wird die Verbindungsstelle erwärmt, was eine Wärmeerzeugung anzeigt.

Diese Wärmewirkung des Stromes an der Verbindungsstelle ist von ganz anderer Art als die gewöhnliche Wärmeerzeugung durch den Strom, wenn er den Widerstand eines Leiters überwindet. Die letztere, welche wir mit Thomson die Wärmeerzeugung durch elektrische Reibung nennen können, ist dieselbe, wenn die Richtung des Stromes umgekehrt wird und variiert wie das Quadrat der Stromstärke. Die erstere dagegen, welche wir die Peltiersche Wärme nennen wollen, wird entgegengesetzt, wenn der Strom umgekehrt wird und hängt einfach von der Stromstärke ab.

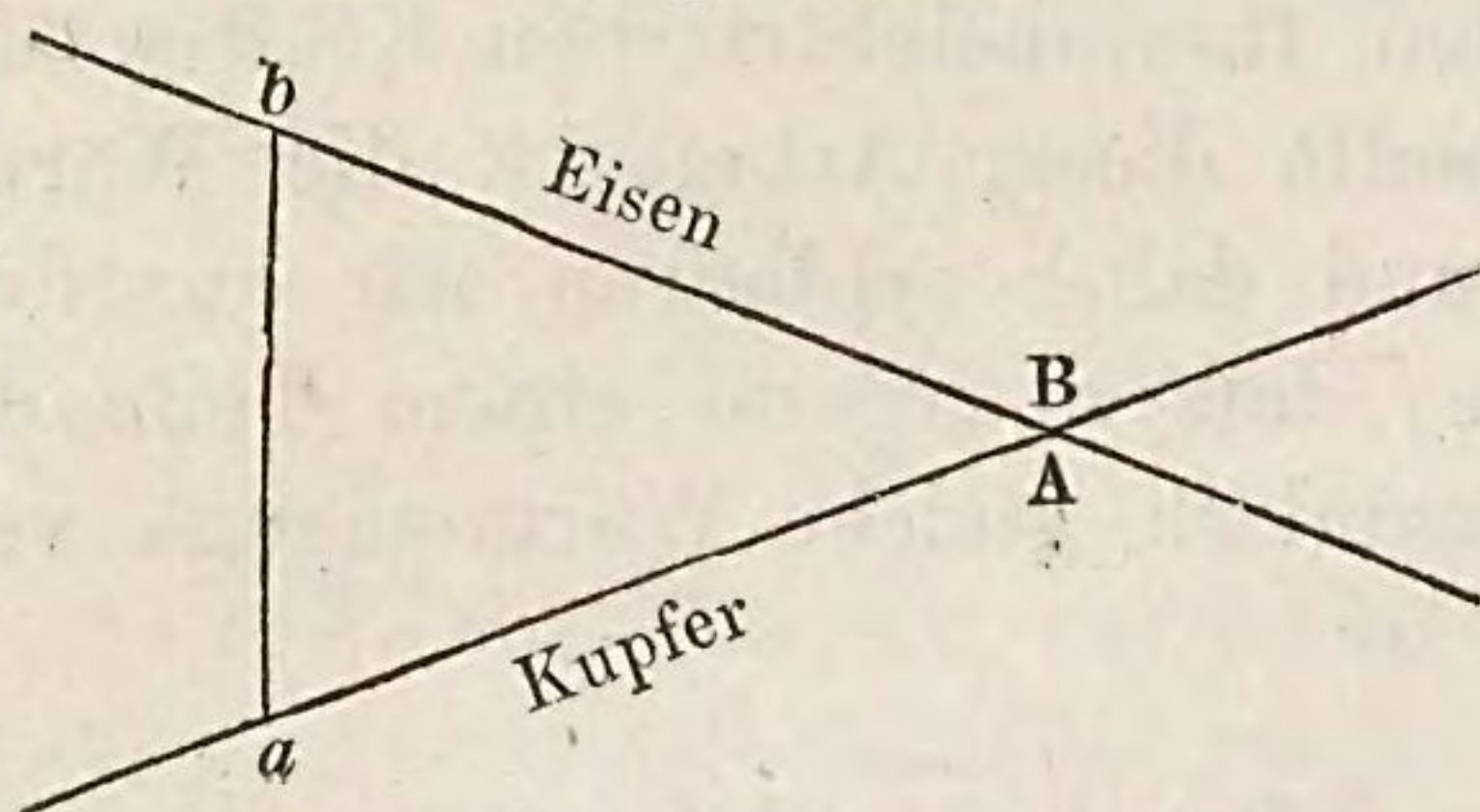
167. Aber Thomson hat gezeigt, daß neben der Peltierschen Wärme in gewissen Metallen noch eine andere umkehrbare thermische Wirkung des Stromes vorhanden sein muß. Der Strom muß Wärme erzeugen oder absorbieren, wenn er von wärmeren zu kälteren oder von kälteren zu wärmeren Teilen desselben Metalles übergeht. Es werde z. B. ein thermoelektrisches Element von Kupfer und Eisen mit seiner einen Verbindungsstelle auf der neutralen Temperatur gehalten, welche ungefähr 280° C. ist, und die andere *ab* auf etwas niedrigerer Temperatur (s. Fig. 37 a. f. S.). Der thermoelektrische Strom geht an der warmen Verbindungsstelle *AB* vom Kupfer zum Eisen und an der kalten Verbindungsstelle *ab* vom Eisen zum Kupfer.

Nun ist der Peltiersche Effekt an der warmen Verbindungsstelle *AB* gleich Null, denn diese Verbindungsstelle ist auf neutraler Temperatur und der Peltiersche Effekt an der kalten Verbindungsstelle *ab* ist eine Wärmeerzeugung, denn der Strom geht dort von

¹⁾ Annales de Chimie et de Physique, 56, p. 371 (1834).

dem Metall mit höherer zu dem mit niederer thermoelektrischer Kraft. Daher muß die Wärmeabsorption, welche wegen der durch den Strom geleisteten Arbeit eintreten muß, in einem andern Teile des Kreises

Fig. 37.



stattfinden, entweder in dem Kupfer, wo der Strom von „kalt“ zu „warm“ fließt, oder in dem Eisen, wo er von „warm“ zu „kalt“ fließt, oder in beiden Metallen. Diese thermische Wirkung des Stromes wurde von Thomson als Resultat eines dem eben angeführten ähnlichen Schlusse vorhergesagt. Später be-

stätigte er diesen Schluß experimentell und fand, daß in ungleichmäßig erwärmtem Eisen ein Strom von „warm“ nach „kalt“ das Metall abkühlt, während ein Strom „kalt“ nach „warm“ es erwärmt und daß im Kupfer die entgegengesetzte thermische Wirkung eintritt. Wir wollen diese Wärmewirkung den Thomsonschen Effekt nennen.

168. Thomson hat gezeigt, daß eine sehr enge Analogie zwischen diesen thermoelektrischen Erscheinungen und denen besteht, welche eine Flüssigkeit zeigt, die in einer aus zwei vertikalen und zwei sie verbindenden horizontalen Teilen bestehenden Röhre zirkuliert. Wird die Flüssigkeit in einem Teile des Körpers erwärmt und geht sie in kältere Teile des Systems über, so wird sie Wärme abgeben, und wenn die Flüssigkeit von kälteren zu wärmeren Teilen übergeht, so wird sie Wärme absorbieren. Die Menge der abgegebenen oder absorbierten Wärme hängt von der spezifischen Wärme der Flüssigkeit ab. Nach dieser Analogie führt positive oder Glaselektrizität im Kupfer Wärme mit sich, als ob sie eine wirkliche Flüssigkeit wäre, aber im Eisen verhält sie sich, als ob ihre spezifische Wärme eine negative Größe wäre, was in einer wirklichen Flüssigkeit nicht der Fall sein kann. Daher drückt Thomson diese Thatsache aus, indem er sagt, daß im Eisen negative oder Harzelektrizität Wärme mit sich führt. Indes kann keine von beiden Arten der Elektrizität in dieser Hinsicht als wirkliche Flüssigkeit betrachtet werden. Wir können daher bei der gewöhnlichen Übereinkunft bleiben und von der positiven Elektrizität allein sprechen. Dann müssen wir sagen, daß sie sich im Kupfer so verhält, als ob ihre spezifische Wärme positiv wäre und im Eisen so, als ob sie negativ wäre.

169. Le Roux ¹⁾, der einige sehr sorgfältige Experimente über den Thomsonschen Effekt gemacht hat, findet, daß im Blei die spezifische Wärme der Elektrizität entweder Null oder sehr klein ist.

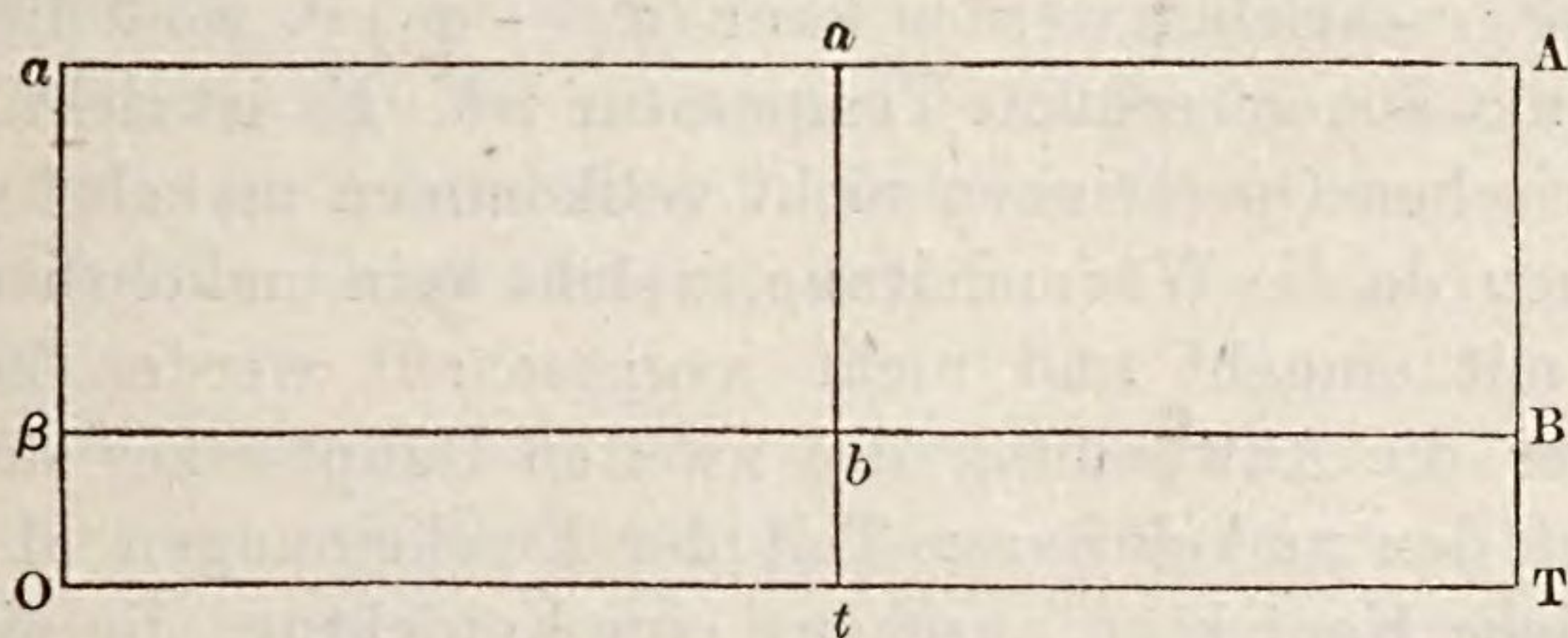
¹⁾ Annales de Chimie et de Physique (4), x. p. 243 (1867).

Professor Tait hat deswegen bei seinen thermoelektrischen Messungen Blei als das Normalmetall gewählt.

170. Wir können den Peltierschen und den Thomsonschen Effekt dadurch zusammenfassen, daß wir feststellen: wenn ein elektrischer Strom von Stellen kleinerer zu Stellen größerer thermoelektrischer Kraft fließt, wird Wärme absorbiert, und wenn er in der umgekehrten Richtung fließt, wird Wärme erzeugt, und zwar geschieht das, mag nun die Differenz in der thermoelektrischen Kraft an den beiden Stellen von einem Unterschiede in der Natur der Metalle oder von einer Temperaturdifferenz in demselben Metall herrühren.

171. Die Menge der absorbierten Wärme, die einer gegebenen Zunahme der thermoelektrischen Kraft entspricht, muß sowohl von der Temperatur als von der Gröfse dieser Zunahme abhängen. Denn

Fig. 38.



betrachten wir einen Kreis, der aus zwei Metallen besteht, von denen keines den Thomsonschen Effekt zeigt. Ein solcher Kreis würde in dem thermoelektrischen Diagramm durch das Parallelogramm $AabB$ mit horizontalen und vertikalen Seiten dargestellt sein.

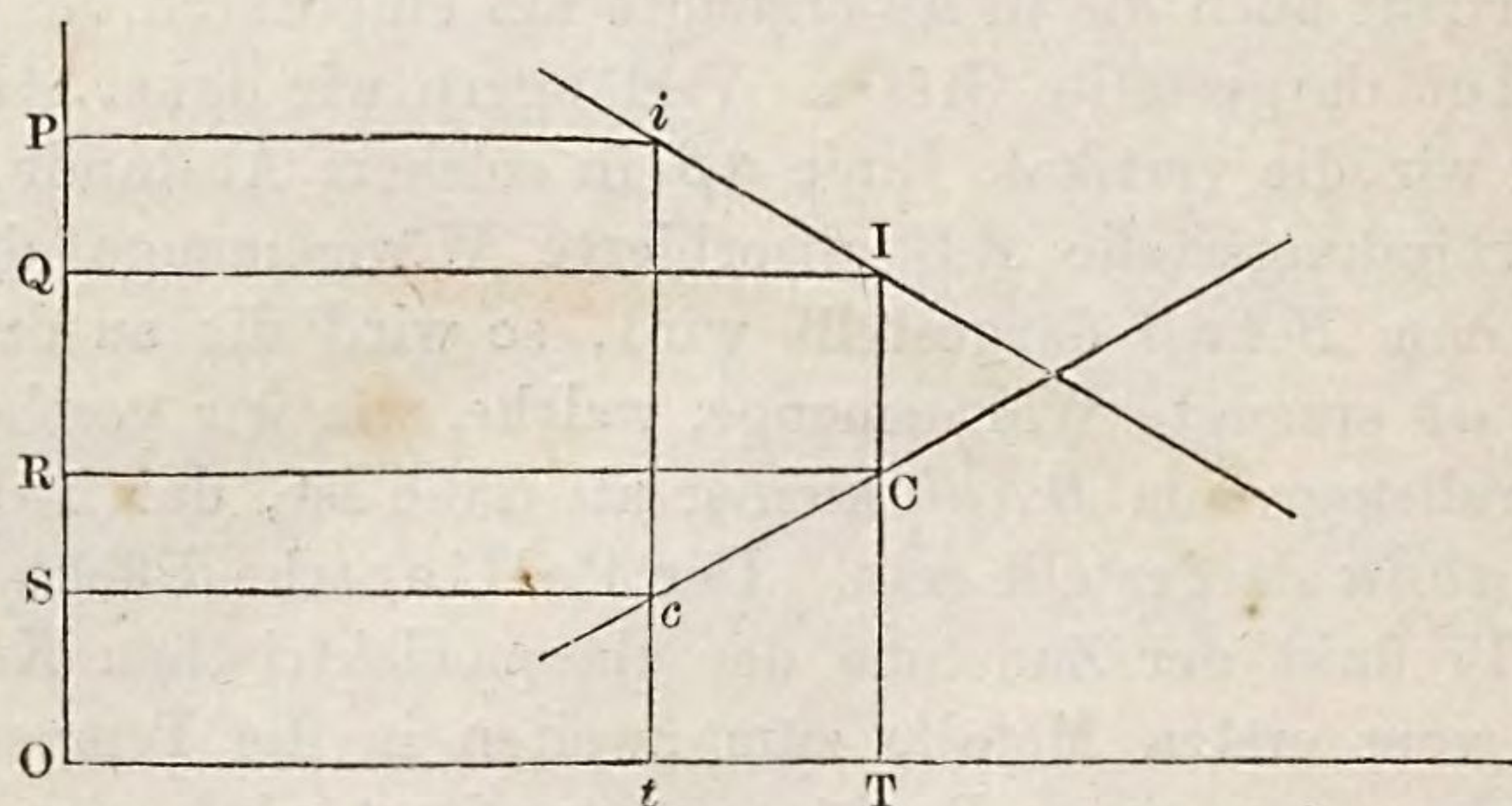
Wenn der Strom in der Richtung $AabB$ fließt, so wird Wärme in BA absorbiert und in ab erzeugt und sonst tritt nirgends ein umkehrbarer thermischer Effekt auf. Die in BA absorbierte Wärmemenge übertrifft auch die in ab erzeugte um eine durch das Parallelogramm $BAab$ dargestellte Gröfse. Verlängern wir daher Aa und Bb und ziehen wir die vertikale Linie $\alpha\beta$ in solchem Abstände, daß die an der Verbindungsstelle AB absorbierte Wärmemenge durch das Parallelogramm $BA\alpha\beta$ dargestellt wird, so wird die an der Verbindungsstelle ab erzeugte Wärmemenge, welche, wie wir gesehen haben, um das Parallelogramm $BAab$ kleiner als diese ist, durch das Parallelogramm $ab\beta\alpha$ dargestellt sein. Der Peltiersche Effekt wird also durch das Produkt der Zunahme der thermoelektrischen Kraft beim Übergange vom ersten Metalle zum zweiten in die Temperatur gemessen, welche von einem Punkte an gerechnet wird, der niedriger als alle beobachteten Temperaturen ist. Der Peltiersche Effekt ist also von der Form $(\varphi_2 - \varphi_1)(t - t_1)$, wenn der Strom von einem Metall, dessen thermoelektrische Kraft φ_1 ist, zu einem Metall fließt

in welchem diese φ_2 ist, und worin t die Thermometerangabe und t_1 eine Konstante ist, deren Wert nur durch das Experiment bestimmt werden kann.

172. So weit sind wir durch das Prinzip der Erhaltung der Energie geleitet worden. Es ist jedoch eine Folgerung aus dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie, daß in allen vollkommen umkehrbaren Prozessen, in welchen Wärme in Arbeit oder Arbeit in Wärme verwandelt wird, daß in allen solchen Prozessen die bei der höheren Temperatur absorbierte oder abgegebene Wärmemenge sich zu der bei der niederen Temperatur abgegebenen oder absorbierten Wärmemenge verhält, wie die höhere Temperatur zu der niederen, beide vom absoluten Nullpunkt der Temperatur an gerechnet. Daraus folgt, daß die Linie $\alpha\beta$ an der dem absoluten Nullpunkte entsprechenden Stelle gezogen werden muß und daß der Ausdruck für die absorbierte Wärmemenge geschrieben werden kann $(\varphi_2 - \varphi_1) \vartheta$, wo ϑ die vom absoluten Nullpunkt aus gerechnete Temperatur ist. Es ist richtig, daß die thermoelektrischen Operationen nicht vollkommen umkehrbar gemacht werden können, da die Wärmeleitung, welche kein umkehrbarer Prozeß ist, immer mit eingeht und nicht weggeschafft werden kann. Wir müssen daher die Anwendung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik auf den umkehrbaren Teil der Erscheinungen als eine sehr wahrscheinliche Konjektur ansehen, eine Konjektur, die mit anderen Partien der Wärmetheorie verträglich ist und angenähert durch die von Le Roux ausgeführten Messungen des Peltierschen und Thomsonschen Effekts bestätigt wird.

173. Wir sind jetzt im Stande, alle thermischen und elektromotorischen Wirkungen durch die Flächen in dem thermoelektrischen Diagramm auszudrücken. Es sei Ii die Linie für ein Metall, z. B.

Fig. 39.



Eisen, Cc die für ein anderes, z. B. Kupfer. Es sei T die höhere Temperatur, t die niedrigere und O stelle die Lage des absoluten Nullpunkts dar. Der Strom fließe in der Richtung $CIic$, bis eine Elek-

trizitätseinheit durchgegangen ist. Dann wird die an der warmen Verbindungsstelle absorbierte Wärme durch die Fläche $CiQR$ dargestellt sein. Das ist der Peltiersche Effekt.

Die in dem Eisen absorbierte Wärmemenge wird dargestellt durch $IiPQ$ (Thomsonscher Effekt); die an der kalten Verbindungsstelle erzeugte Wärme durch $icSP$ (Peltierscher Effekt); die in dem Kupfer absorbierte Wärmemenge durch $cCRS$ (Thomsonscher Effekt).

Die gesamte absorbierte Wärmemenge ist daher dargestellt durch $CIiPSc$ und die erzeugte durch $icSP$, so daß $CIic$ für die absorbierte Wärmemenge als Resultat der ganzen Operation bleibt. Diese Wärme wird für die von dem elektrischen Strom zu leistende Arbeit verwendet.

174. Entropie¹⁾ in der mechanischen Wärmetheorie ist eine Gröfse, die für jeden Körper eine bestimmte ist, und deren Vermehrung oder Verminderung angibt, daß Wärme in den Körpern ein- oder aus ihm ausgetreten ist. Die Wärmemenge, welche in den Körper ein- oder aus ihm austritt, wird durch das Produkt der Zunahme oder Abnahme der Entropie in die Temperatur gemessen, bei welcher dieser Prozeß vor sich geht.

In diesem Werke haben wir es vermieden, irgend eine Annahme darüber zu machen, ob Elektrizität körperlich oder nicht körperlich ist, und wir müssen daher auch jede Behauptung vermeiden, welche verführen könnte, zu glauben, daß Elektrizität, wie ein Körper, Wärme aufnehmen oder abgeben kann.

Wir können indes auch ohne eine solche Annahme die Vorstellung der Entropie, die von Clausius und Rankine in die Wärmetheorie eingeführt wurde, benutzen und sie auf gewisse thermoelektrische Erscheinungen ausdehnen, wobei wir uns immer daran erinnern, daß die Entropie nichts Reelles, sondern nur ein Mittel wissenschaftlicher Betrachtung ist, durch welches wir in den Stand gesetzt sind, auf kurze und bequeme Weise die Verhältnisse zu betrachten, unter welchen Wärme abgegeben oder aufgenommen wird.

175. Wenn ein elektrischer Strom von einem Metall zu einem andern übergeht, wird an der Verbindungsstelle der Metalle Wärme abgegeben oder aufgenommen. Wir werden daher annehmen, daß die elektrische Entropie sich vermehrt oder vermindert hat, wenn die Elektrizität von dem einen Metall zu dem andern übergeht. Die elek-

¹⁾ Die Artikel 174 bis 181 bestehen hauptsächlich aus einer Wiederholung der Artikel 167 bis 173, nur in der Sprache der Lehre von der Entropie. Es war wahrscheinlich die Absicht Maxwells, sie ganz so oder mit einigen Veränderungen an Stelle der vorhergehenden Artikel einzureihen; es schien jedoch am besten, das fortlaufende Manuskript nicht zu ändern, sondern die Artikel getrennt hier einzureihen, da sie eine etwas andere Methode enthalten, den zweiten Hauptsatz auf thermoelektrische Phänomene anzuwenden.

trische Entropie ist verschieden je nach der Natur des Mediums, in welchem die Elektrizität sich befindet, und hängt von seiner Temperatur, seinen Spannungen und Deformationen ab. Jedoch nur während der Bewegung der Elektrizität werden überhaupt thermoelektrische Erscheinungen hervorgebracht.

176. Es wird in den Werken über mechanische Wärmetheorie bewiesen, daß bei allen umkehrbaren thermischen Vorgängen die sogenannte Entropie des Systems dieselbe bleibt ¹⁾.

Die Entropie eines Körpers ist eine Gröfse, welche, wenn der Körper eine Wärmemenge H aufnimmt (oder abgibt), selbst um eine Gröfse $\frac{H}{\vartheta}$ zunimmt (oder abnimmt), wo ϑ die Temperatur ist, vom absoluten Nullpunkt aus gerechnet. Die Entropie eines materiellen Systems ist die Summe der Entropieen seiner Teile.

177. Die thermischen Wirkungen von elektrischen Strömen sind zum Teil umkehrbar, zum Teil nicht umkehrbar; aber die umkehrbaren Wirkungen, wie die von Peltier und Thomson entdeckten, sind immer klein im Vergleich mit den nicht umkehrbaren Wirkungen — der Erzeugung der Wärme durch elektrische Reibung und der Verteilung der Wärme durch Leitung. Wir können daher den Beweis des Theorems, welcher sich auf vollkommen umkehrbare Prozesse bezieht, nicht auf thermoelektrische Erscheinungen ausdehnen.

Jedoch haben wir, wie Sir W. Thomson ausgeführt hat, starke Gründe, zu vermuten, daß der umkehrbare Teil der thermoelektrischen Wirkungen denselben Bedingungen unterworfen ist, wie andere umkehrbare thermische Operationen. Diese Vermutung ist bisher noch durch kein Experiment widerlegt worden und sie kann künftig durch sorgfältige elektrische und kalorimetrische Messungen geprüft werden. Inzwischen können die Folgerungen, welche aus dieser Vermutung fließen, bequem durch eine Ausdehnung des Begriffes Entropie auf elektrische Erscheinungen beschrieben werden.

Der Ausdruck elektrische Entropie, wie wir ihn brauchen wollen, entspricht dem Ausdrucke „Thermoelektrische Kraft“, wie er von Sir W. Thomson in seiner fünften Abhandlung über die mechanische Wärmetheorie definiert wurde (Trans. R. S. E. 1. Mai 1854. Art. 140, p. 151).

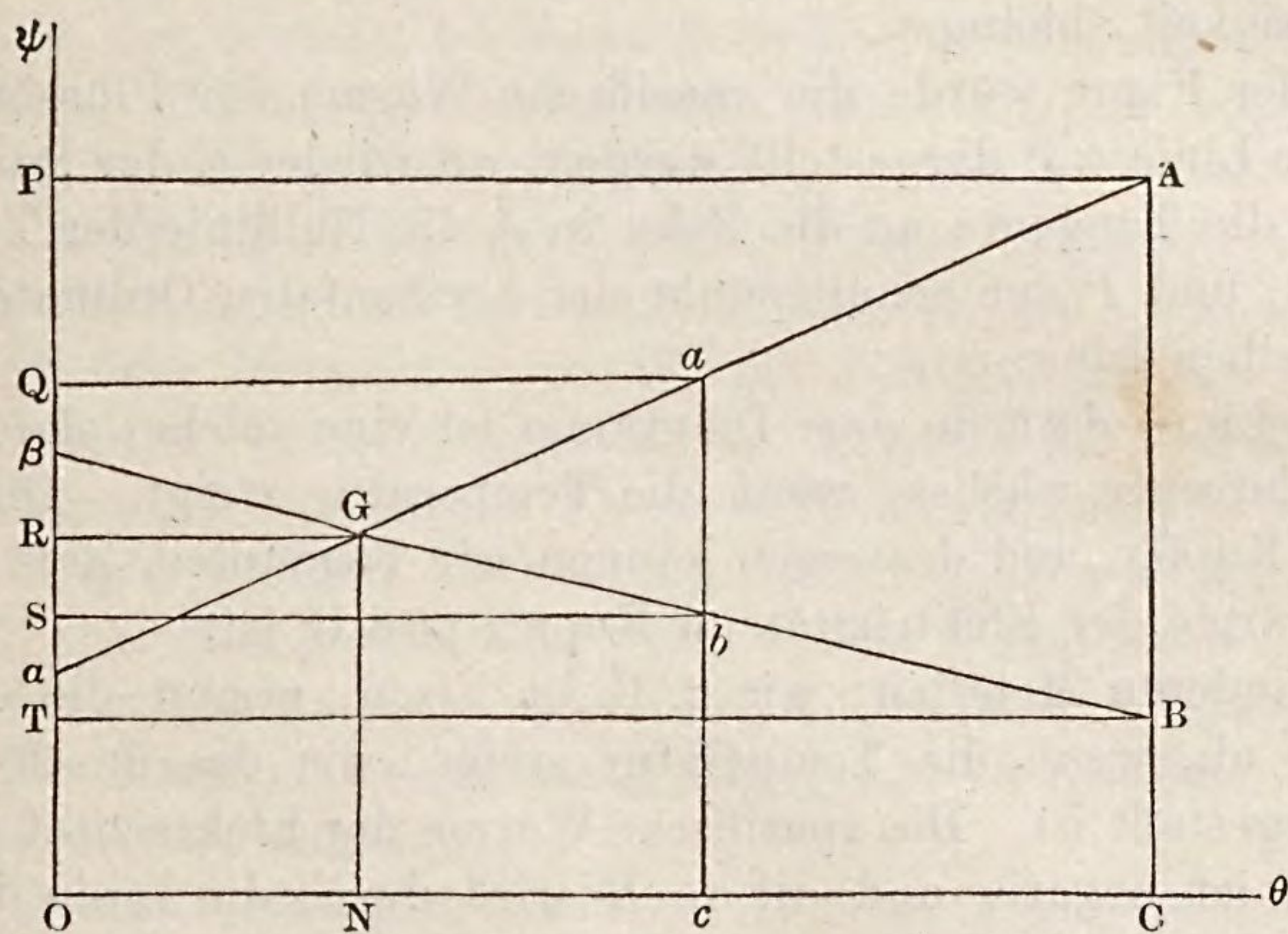
¹⁾ Maxwell, Theory of heat, 5. Aufl., S. 190. Deutsche Ausgabe von Auerbach, S. 188, Neesen, S. 186.

Thermoelektrisches Diagramm.

178. Die beste Methode, die Theorie der thermoelektrischen Erscheinungen zu studieren, ist die mit Hülfe einer Figur, in welcher die Temperatur und die elektrische Entropie eines Metalls in einem Augenblicke durch die horizontalen und vertikalen Koordinaten eines Punktes in der Figur dargestellt werden. Wenn z. B. OC die Temperatur eines Stückes eines bestimmten Metalls darstellt, gerechnet vom absoluten Nullpunkte der Temperatur, und wenn CA die elektrische Entropie desselben Stückes Metall darstellt, dann wird der Punkt A durch seine Lage in der Figur den thermoelektrischen Zustand des Metallstückes repräsentieren. Ebenso können wir andere Punkte der Figur finden, welche demselben Metall unter anderen Verhältnissen oder anderen Metallen entsprechen.

Wenn Elektrizität in der Bahn eines elektrischen Stromes von einem Metall zu einem andern oder von einem Teile eines Metalls zu einem andern mit verschiedener Temperatur übergeht, so werden die verschiedenen Punkte des elektrischen Kreises durch entsprechende Punkte in dem thermoelektrischen Diagramm dargestellt sein. Die

Fig. 40.



Bahn des Stromes wird so durch eine Linie oder eine Bahn in dem thermoelektrischen Diagramm dargestellt sein. Wenn der Strom in einem einzigen Metalle, A , fließt, von einem Punkt mit der Temperatur OC zu einem andern mit der Temperatur Oc , so wird die Bahn durch die Linie Aa dargestellt, deren Punkte den Zustand des Metalls bei zwischenliegenden Temperaturen darstellen. Die Gestalt der

Bahn hängt von der Natur des Metalls und von anderen Einflüssen ab, welche auf dasselbe aufser der Temperatur noch wirken, wie Spannungen und Deformationen. Professor Tait findet jedoch, dafs für die meisten Metalle aufser Eisen und Nickel die Bahn in dem thermoelektrischen Diagramm eine gerade Linie ist.

Wenn der Strom von dem Metall A zu einem andern Metall B von derselben Temperatur fließt, so wird die Bahn durch AB , eine vertikale gerade Linie, dargestellt. Der von dem elektrischen Strome durchflossene Stromkreis wird so durch eine geschlossene Figur in dem thermoelektrischen Diagramm dargestellt.

Die Wärme, welche erzeugt wird, während eine Elektrizitätseinheit sich längs der Bahn Aa bewegt, wird durch die Fläche der Figur $AaQPA$ dargestellt, die durch die Bahn Aa , die horizontale Ordinate in a , die Linie der Temperatur Null und die horizontale Ordinate in A begrenzt wird. Wenn diese Fläche rechts von der Bahn liegt, so stellt sie erzeugte Wärme dar; liegt sie links von der Bahn, so stellt sie absorbierte Wärme dar.

179. Wenn Elektrizität eine Flüssigkeit wäre, die durch den Leiter strömen würde, wie Wasser durch eine Röhre, und immer Wärme abgäbe oder aufnähme, bis ihre Temperatur die des Leiters wäre, dann würde sie, wenn sie von „warm“ zu „kalt“ strömt, Wärme abgeben, und wenn sie von „kalt“ zu „warm“ strömt, Wärme absorbieren und die Gröfse dieser Wärmemenge würde von der spezifischen Wärme der Flüssigkeit abhängen.

In der Figur würde die spezifische Wärme der Flüssigkeit in A durch die Linie αP dargestellt werden, wo wieder α der Punkt ist, in welchem die Tangente an die Bahn in A die Nulllinie der Temperatur schneidet, und P der Schnittpunkt der horizontalen Ordinate durch A mit derselben Linie ist.

Die Linie $Aa\alpha$ in dem Diagramm ist eine solche, dafs die elektrische Entropie wächst, wenn die Temperatur steigt. Dies ist der Fall bei Kupfer, und deswegen können wir behaupten, dafs die spezifische Wärme der Elektrizität im Kupfer positiv ist.

In anderen Metallen, wie z. B. im Eisen, nimmt die elektrische Entropie ab, wenn die Temperatur steigt, wie das durch die Linie βbB dargestellt ist. Die spezifische Wärme der Elektrizität in solchen Metallen ist negativ und die in B wird durch die Linie βT dargestellt.

180. Thomson, der zuerst theoretisch und dann durch experimentelle Prüfung den thermischen Effekt eines elektrischen Stromes in einem ungleichförmig erwärmten Metalle entdeckte, drückt diese Thatsache aus, indem er sagt, dafs im Kupfer Glaselektrizität Wärme mit sich führt, während im Eisen Harzelektrizität sie mit sich führt.

Wir müssen uns jedoch daran erinnern, daß diese Ausdrücke von Thomson nicht gesucht wurden und wir dürfen sie nicht so auffassen, als ob darin läge, daß positive oder negative Elektrizität eine Flüssigkeit ist, welche erwärmt oder abgekühlt werden kann und welche eine bestimmte spezifische Wärme hat. Da daher diese ganze Reihe von Ausdrücken nur aus Analogie gewählt ist, so wollen wir bei der gewöhnlichen Übereinkunft bleiben, nach welcher Glaselektrizität positiv gerechnet wird, und wollen sagen, daß die spezifische Wärme der Elektrizität positiv ist im Kupfer, dagegen negativ im Eisen.

Die selbstverständliche Thatsache, daß keine wirkliche Flüssigkeit eine negative spezifische Wärme haben kann, braucht uns nicht zu stören; denn wir behaupten ja nicht, daß Elektrizität eine wirkliche Flüssigkeit ist.

181. Betrachten wir nun einen Kreis, der aus zwei linearen Leitern aus den Metallen A , beziehungsweise B besteht; die beiden Verbindungsstellen seien auf verschiedene Temperaturen gehalten, die in der Figur durch OC und Oc dargestellt sind. Dieser elektrische Kreis wird in der Figur durch den geschlossenen Weg $AabBA$ dargestellt sein. Wenn der Strom in der Richtung $AabBA$ fließt, während eine Elektrizitätseinheit durchgeht, so werden folgende thermische Wirkungen auftreten.

1) In dem Metall A wird Wärme erzeugt werden, da die Elektrizität von der warmen Verbindungsstelle zu der kalten fließt. Die Menge dieser Wärme wird durch die Fläche $AaQPA$ dargestellt.

2) In der kalten Verbindungsstelle, wo die Elektrizität vom Metall A zum Metall B übergeht, wird Wärme erzeugt. Der Betrag dieser Wärmemenge wird durch die Fläche $abSQa$ dargestellt.

3) In dem Metall B wird Wärme erzeugt, da die Elektrizität von der kalten Verbindungsstelle zur warmen fließt. Der Betrag dieser Wärme wird durch die Fläche $bBTSb$ dargestellt.

4) In der warmen Verbindungsstelle, wo die Elektrizität vom Metall B zum Metall A fließt, wird Wärme absorbiert werden. Der Betrag dieser Wärmemenge wird durch die Fläche $BAPTb$ dargestellt. Die umgekehrte Ordnung der Buchstaben zeigt, daß diese Fläche negativ zu nehmen ist.

Die gesamte erzeugte Wärmemenge wird daher durch die Fläche $AabBTPA$, und die gesamte absorbierte Wärmemenge durch die Fläche $BAPTb$ dargestellt. Die Totalwirkung ist daher eine Wärmeabsorption, dargestellt durch die Fläche $AabBA$.

Die dieser Wärme entsprechende Energie kann nicht verloren sein. Sie ist in elektrische Arbeit verwandelt worden, die zur Unterhaltung des Stromes von einer in der Richtung des Stromes wirkenden elektromotorischen Kraft aufgewendet wird. Da die von dem Strom hindurch-

geschickte Elektrizitätsmenge als Einheit angenommen wurde, so muß die Energie, welche das Produkt der elektromotorischen Kraft in die durchgeschickte Elektrizitätsmenge ist, gleich der elektromotorischen Kraft selbst sein.

Die elektromotorische Kraft wird daher durch die Fläche $AabBA$ dargestellt, und sie wirkt in der Richtung, die durch die Reihenfolge der Buchstaben angegeben ist, d. h.

Warm, Metall A , kalt, Metall B , warm.

Diese elektromotorische Kraft wird, wenn der Widerstand des Kreises endlich ist, einen wirklichen Strom hervorbringen ¹⁾. Solche Ströme waren es gerade, welche zur Entdeckung der thermoelektrischen Eigenschaften von metallischen Kreisen durch Seebeck im Jahre 1822 führten.

182. Die durch die Wärme entstehenden elektrischen Wirkungen wurden vor den Wärmewirkungen, die durch den elektrischen Strom entstehen, entdeckt, aber die Anwendung der thermischen Wirkungen des Stromes zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft, die in den verschiedenen Teilen des Stromes wirkt, verdanken wir Sir W. Thomson ²⁾. Es ist klar, daß wir in einem heterogenen Kreise die elektromotorische Kraft, die vom Punkte A zum Punkte B wirkt, nicht dadurch bestimmen können, daß wir einfach diese Punkte durch Drähte mit den Elektroden eines Galvanometers oder Elektrometers verbinden; denn wir wissen nichts über die elektromotorischen Kräfte, die an den Verbindungsstellen dieser Drähte mit dem Material des Kreises in A und B wirken.

Wenn wir aber einen Strom von bekannter Stärke von A nach B fließen lassen, und wenn dieser Strom die Erzeugung einer Wärmemenge gleich H in diesem Teile des Stromkreises verursacht und wenn keine chemische, magnetische oder andere permanente Wirkung in der Materie des Leiters zwischen A und B stattfindet, dann wissen wir, daß, wenn Q die gesamte Elektrizitätsmenge ist, welche von A nach B gesendet wurde und wenn E die elektromotorische Kraft in der Richtung von B nach A ist, welche der Strom zu überwinden hat, daß dann die von dem Strome geleistete Arbeit QE ist. Diese Arbeit ist in einem bestimmten Gebiete geleistet, nämlich in dem Teile

¹⁾ Die zum Treiben des Stromes aufgewendete Energie wird, wenn sie nicht sonst gebraucht wird, zuletzt durch die Reibungswiderstände der Metalle in Wärme verwandelt werden. Die durch diese nicht umkehrbare Wirkung erzeugte Wärme muß von den Thomsonschen und Peltierschen Effekten unterschieden werden, und sie ist in dem thermoelektrischen Diagramm durch die Fläche $ABbaA$ dargestellt.

²⁾ Trans. R. S., Edinb. 1854.

AB des Leiters, und sie ist ganz dazu verwendet, um in diesem Gebiete Wärme zu erzeugen. Daher haben wir, wenn wir die in dem Teile AB erzeugte Wärmemenge, gemessen in dynamischen Masse, mit H bezeichnen, die Gleichung

$$QE = H$$

und da Q und H gemessen werden können, so können wir die elektromotorische Kraft E , die gegen den Strom wirkt, bestimmen. Wenn die elektromotorische Kraft in derselben Richtung wirkt, in der der Strom fließt, so ist die erzeugte Wärme negativ, oder in anderen Worten, es findet Wärmeabsorption statt.

Bei dieser Untersuchung müssen wir uns daran erinnern, daß E die gesamte elektromotorische Kraft darstellt, die gegen den Strom wirkt. Nun entsteht ein Teil dieser elektromotorischen Kraft aus dem elektrischen Widerstande des Leiters. Dieser Teil wirkt immer gegen den Strom und ist dem Strome proportional nach dem Ohm'schen Gesetze.

Der andere Teil der elektromotorischen Kraft wirkt in bestimmter Richtung, entweder von A nach B oder von B nach A und ist unabhängig von der Richtung des Stromes. Es ist im allgemeinen dieser letztere Teil der elektromotorischen Kraft, welcher als die elektromotorische Kraft von A nach B bezeichnet wird.

Es ist leicht, den von dem Widerstand herrührenden Teil zu eliminieren, indem man zwei Experimente macht, bei denen man Ströme von gleicher Stärke einmal von A nach B , das andere Mal von B nach A fließen läßt. Der Überschufs der im zweiten Falle erzeugten Wärme über die im ersten Falle erzeugte, pro Einheit der durchgesendeten Elektrizität, ist dem Zahlenwerte nach gleich dem Doppelten der elektromotorischen Kraft von A bis B .

183. Die gesamte elektromotorische Kraft in einem Stromkreise läßt sich leicht messen, indem man den Stromkreis an einer Stelle, wo er homogen ist, unterbricht und die Potentialdifferenz an den beiden Enden bestimmt. Dies kann auf eine der gewöhnlichen Methoden zur Bestimmung von elektromotorischer Kraft oder von Potentialdifferenzen geschehen, da in diesem Falle die beiden Enden von derselben Substanz und auf gleichen Temperaturen sind. Aber wir können nach dieser Methode nicht bestimmen, wieviel von dieser elektromotorischen Kraft ihren Sitz in einem speziellen Teile des Stromkreises hat, z. B. zwischen A und B , wo A und B von verschiedenen Substanzen oder auf verschiedenen Temperaturen sind. Die einzige Methode, durch welche wir bestimmen können, wo die elektromotorische Kraft wirkt, ist die, daß wir die während des Durchgangs einer Elektrizitätseinheit von A nach B erzeugten oder absorbierten Wärmemengen messen.

184. In den bisher betrachteten Fällen ist die einzige permanente Wirkung des Stromes die Erzeugung oder Absorption von Wärme gewesen; denn Metalle werden in keiner Hinsicht dadurch verändert, daß ein kontinuierlicher Strom durch sie fließt. Aber wenn der Strom von einem Metall zu einem Elektrolyten oder von einem Elektrolyten zu einem Metall fließt, so treten chemische Veränderungen ein und bei der Anwendung des Prinzips der Erhaltung der Energie müssen wir diese Veränderungen ebenso wie die thermischen Effekte berücksichtigen.

Wir wollen einen Strom betrachten, der von der Anode nach der Kathode durch einen Elektrolyten fließt. Die Fundamentalerscheinung der Elektrolyse ist das Freiwerden der Komponenten oder Ionen des Elektrolyten, des Anions an der Anode und des Kations an der Kathode. Dies ist die einzige rein elektrolytische Wirkung; die weiteren Erscheinungen hängen von der Natur der Ionen, der Elektroden und des Elektrolyten ab und gehen nach chemischen und physikalischen Gesetzen in einer Weise vor sich, die von dem elektrischen Strome offenbar unabhängig ist. Das Ion z. B., wenn es an der Elektrode frei wird, kann sich verschieden verhalten, je nach den Bedingungen, die es dort vorfindet. Es kann in solcher Beschaffenheit sein, daß es weder auf die Elektrode noch auf den Elektrolyten wirkt, wie z. B., wenn es ein Gas ist, das in Blasen entweicht, oder eine in dem Elektrolyten unlösliche Substanz, welche gefällt wird. Es kann auf der Oberfläche der Elektrode abgelagert werden, wie es Wasserstoff auf Platin wird, und kann an dieser Oberfläche mehr oder weniger hartnäckig haften, von einfacher Anlagerung bis zu chemischer Verbindung. Wenn es in dem Elektrolyten löslich ist, so wird es nach dem gewöhnlichen Diffusionsgesetz durch den Elektrolyten hindurchgehen und die Stärke dieser Diffusion wird, so viel wir wissen, nicht durch die Anwesenheit des elektrischen Stromes in dem Elektrolyten beeinflusst; denn der Strom bringt die elektrolytische Wanderung der Ionen nur hervor, wenn sie in chemischer Verbindung sind, nicht wenn sie bloß in dem Elektrolyten gelöst sind. Wenn z. B. Wasserstoff ein Ion ist, so kann ein Teil von ihm in Blasen entweichen, ein Teil kann auf der Elektrode kondensiert werden, ein Teil kann ohne Verbindung in dem Elektrolyten absorbiert werden und durch gewöhnliche Diffusionen durch ihn hindurchwandern.

185. Das freigewordene Ion kann auch chemisch auf die Elektrode oder auf den Elektrolyten einwirken. Die Resultate einer solchen Einwirkung werden sekundäre Produkte der Elektrolyse genannt, und diese sekundären Produkte können an der Oberfläche der Elektroden bleiben oder sie können durch den Elektrolyten diffundieren. Wenn z. B. derselbe Strom erst durch eine Lösung von Natriumsulfat zwischen Platinelektroden und dann durch Schwefelsäure geht, so werden

gleiche Volumina Sauerstoff an den Anoden der beiden Elektrolyten und gleiche Volumina Wasserstoff, jedes gleich dem doppelten Volumen des Sauerstoffs, an den Kathoden auftreten.

Wenn aber die Elektrolyse in passenden Gefäßen, wie in U-förmigen Röhren oder in Gefäßen mit einem porösen Diaphragma, ausgeführt wird, so daß die Substanz an jeder Elektrode geprüft werden kann, so findet man, daß an der Anode in dem Natriumsulfat ein Äquivalent Schwefelsäure und ein Äquivalent Sauerstoff vorhanden ist, und an der Kathode ein Äquivalent Natron und zwei Äquivalente Wasserstoff vorhanden sind. Auf den ersten Anblick könnte es scheinen, als ob (nach der alten Theorie der Konstitution der Salze) das Natriumsulfat in seine Konstituenten Schwefelsäure und Natron elektrolysiert wäre, während das Lösungswasser zu gleicher Zeit in Sauerstoff und Wasserstoff elektrolysiert wäre. Aber diese Erklärung würde die Annahme in sich schließen, daß derselbe Strom, welcher, wenn er durch verdünnte Schwefelsäure geht, nur ein Äquivalent Wasser elektrolysiert, zwei Äquivalente elektrolysieren würde, wenn er durch die Lösung von schwefelsaurem Natron geht, eins von dem Salz und eins von Wasser, und dies würde dem Gesetze der elektrochemischen Äquivalente widersprechen. Wenn wir aber annehmen, daß die Komponenten des Natriumsulfats nicht SO_3 und Na_2O , sondern SO_4 und Na_2 sind — nicht Schwefelsäure und Natron, sondern das hypothetische Sulfium und Natrium — dann tritt ein Äquivalent Sulfium an die Anode und wird frei, aber da es im freien Zustande nicht existieren kann, so zersetzt es sich in Schwefelsäureanhydrid und Sauerstoff. Zu gleicher Zeit werden zwei Äquivalente Natrium an der Kathode frei und zersetzen dann das Lösungswasser, indem sie zwei Äquivalente Natron (NaOH) und zwei Äquivalente Wasserstoff bilden.

In der verdünnten Schwefelsäure sind die an den Elektroden sich sammelnden Gase die Konstituenten des Wassers, nämlich ein Volumen Sauerstoff und zwei Volumen Wasserstoff. Es tritt auch eine Zunahme von Schwefelsäure an der Anode ein, aber ihr Betrag ist kleiner als ein Äquivalent.

186. Es folgt aus diesen Betrachtungen, daß wir, um die elektromotorische Kraft zu bestimmen, die von einem Metall zu einem Elektrolyten wirkt, die gesamten permanenten Wirkungen berücksichtigen müssen, die der Übergang einer Einheit Elektrizität von dem Metall zu dem Elektrolyten nach sich zieht. Wenn z. B. der Elektrolyt Zinksulfat ist, mit Zinkelektroden, so wird für jede Elektrizitätseinheit eine gewisse Wärmemenge an der Anode erzeugt und zu gleicher Zeit verbindet sich ein Äquivalent Zink mit einem Äquivalent Sulfium und bildet Zinksulfat. Nun ist die Wärmemenge, welche erzeugt wird, wenn ein Äquivalent Zink sich mit Sauerstoff verbindet, aus den Experimenten von Andrews und Anderen be-

kannt, und ebenso die Wärmemenge, welche entsteht, wenn ein Äquivalent Zinkoxyd sich mit Schwefelsäure verbindet und in Wasser aufgelöst wird, so daß es eine Lösung von Zinksulfat von derselben Dichtigkeit bildet, wie die ist, welche die Elektrode umgibt. Die Summe dieser Wärmemengen, welche wir H nennen wollen, ist äquivalent der ganzen Arbeit, welche durch die chemische Wirkung an der Anode geleistet wird und die daher JH ist (wo J die Joulesche Zahl oder das mechanische Wärmeäquivalent ist). Es sei h die an der Anode während des Durchgangs von einer Elektrizitätseinheit erzeugte Wärme, und es sei E die elektromotorische Kraft, die vom Zink zum Elektrolyten wirkt, d. h. in der Richtung des Stromes. Dann ist die zur Erzeugung der Wärme geleistete Arbeit Jh und die zum Treiben des Stromes aufgewendete Arbeit ist E , so daß die Gleichung der Arbeit

$$JH = Jh + E$$

oder

$$E = J(H - h) \text{ ist.}$$

Von diesen Größen ist H sehr genau bekannt, aber es ist etwas schwierig, h , die Menge der an der Elektrode erzeugten Wärme zu messen, weil die Elektrode in Berührung mit dem Elektrolyten sein muss und daher ein großer und unbekannter Bruchteil der erzeugten Wärme durch Leitung und Konvektion durch den Elektrolyten weggeschafft wird. Die einzige Methode, welche vermutlich von Erfolg sein wird, ist die, die stationäre Temperatur in einem gewissen Abstände von der Elektrode mit der Temperatur an demselben Punkte zu vergleichen, wenn wir an Stelle der Elektrode einen dünnen Draht von bekanntem Widerstande setzen, durch welchen wir einen Strom von bekannter Stärke schicken, so daß in bestimmtem Maße Wärme erzeugt wird. Wenn die Temperaturen in den beiden Fällen gleich sind, so können wir schließen, daß in der Zinkelektrode die Wärme in demselben Betrage erzeugt ist, wie in dem Drahte. Wenn aber der Strom ein starker ist, so wird ein sehr merklicher Teil der gesamten erzeugten Wärme von der Arbeit herrühren, die von dem Strome bei der Überwindung des gewöhnlichen Widerstandes der Elektrode und des Elektrolyten geleistet wird. Da die Elektrode im allgemeinen aus einem Metall gemacht ist, dessen Widerstand gegen den des Elektrolyten sehr klein ist, so wird diese Erzeugung der Wärme durch elektrische Reibung hauptsächlich im Elektrolyten stattfinden. Diese Wärmeerzeugung durch elektrische Reibung kann im Vergleich zu dem umkehrbaren Teile sehr klein gemacht werden dadurch, daß man die Stärke des Stromes verringert; aber dann wird der Betrag der Wärmeerzeugung überhaupt so klein, daß es schwierig ist, ihn zu messen, zumal bei den unvermeidlichen thermischen Störungen, wie sie aus Änderungen in der Temperatur der Luft u. s. w. entstehen. Diese experimentelle Untersuchung hat daher beträchtliche Schwierigkeiten,

und ich weiß nicht, daß die elektromotorische Kraft von einem Metall zu einem Elektrolyten bis jetzt auch nur angenähert gemessen worden ist¹⁾. Nehmen wir indes an, daß die elektromotorischen Kräfte von den Metallen A und B gegen den Elektrolyten C bezüglich A und B sind, und daß die thermoelektrischen Kräfte dieser Metalle bei der Temperatur ϑ a beziehungsweise b sind, dann ist die elektromotorische Kraft von A nach B an ihrer Verbindungsstelle $(b - a) \vartheta$.

Die gesamte elektromotorische Kraft durch den Stromkreis in der Richtung ABC ist

$$(b - a) \vartheta + B - A.$$

Über die Erhaltung der Energie bei der Elektrolyse.

187. Betrachten wir einen elektrischen Strom, der in einem Stromkreise fließt, welcher theils aus Metallen, theils aus Elektrolyten in einer Reihe hintereinander besteht.

Während eine Elektrizitätseinheit durch einen Querschnitt des Kreises hindurchgeht, wird ein elektrochemisches Äquivalent eines jeden der Elektrolyten elektrolysiert. Es ist daher ein bestimmter Betrag von chemischer Aktion vorhanden, entsprechend einer bestimmten Elektrizitätsmenge, die durch den Kreis hindurchgeht. Die einem chemischen Prozeß äquivalente Energie kann direkt oder indirekt bestimmt werden. Wenn der Prozeß derartig ist, daß er von selbst weiter geht, und wenn die einzige äußere Wirkung auf das System die ist, daß die während des Prozesses erzeugte Wärme abgegeben wird, dann muß die innere Energie des Systems während des Prozesses um eine Menge von Energie abnehmen, die der abgegebenen Wärme äquivalent ist. Wenn ein materielles System, das aus bestimmten Mengen beliebig vieler chemischer Substanzen besteht, im Stande ist, in mehreren verschiedenen Zuständen zu bestehen, und wenn das System nicht von selbst von einem dieser Zustände (A) zu einem andern (B) übergeht, so können wir noch die relative Energie des Zustandes (A) gegen den Zustand (B) finden, wofern wir bewirken können, daß beide, der Zustand (A) und der Zustand (B) in den Zustand (C) übergehen, den wir als denjenigen Zustand annehmen können, in welchem alle Verbindungsenergieen des Systems frei geworden sind.

Wenn z. B. die Substanzen in dem Systeme Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff sind, und wenn die Zustände (A) und (B) aus zwei verschiedenen Kohlenwasserstoffen nebst freiem Wasserstoff und

¹⁾ S. Art. 192 und die letzten beiden Absätze der Note auf S. 160.

Sauerstoff bestehen, so können wir im allgemeinen nicht den Zustand (*A*) in den Zustand (*B*) überführen, aber wir können bewirken, daß sowohl (*A*) als (*B*) in den Zustand (*C*) übergehen, in welchem aller Wasserstoff mit Sauerstoff zu Kohlensäure verbunden ist. Auf diese Weise kann die Energie des Zustandes (*A*) in bezug auf die des Zustandes *B* durch Wärmemessungen bestimmt werden.

188. Es wurde von Joule experimentell bewiesen, daß die in dem ganzen elektrischen Stromkreise entwickelte Wärme dieselbe ist bei demselben Aufwand von chemischer Aktion, welches auch der Widerstand des Kreises sei, vorausgesetzt, daß keine andere Form von Energie als Wärme von dem System abgegeben wird.

So ist in einer Batterie, deren Elektroden durch einen kurzen dicken Draht verbunden sind, der Strom sehr stark und die Wärme wird hauptsächlich in den Zellen der Batterie und in viel kleinerer Menge in dem Drahte erzeugt; aber wenn der Draht lang und dünn ist, so ist die in dem Drahte erzeugte Wärme weit größer, als die in den Zellen erzeugte; ziehen wir sowohl die in dem Drahte, als die in den Zellen erzeugte Wärme in Betracht, so finden wir, daß die ganze erzeugte Wärme für jedes Gramm aufgelösten Zinks in beiden Fällen dieselbe ist.

189. Wenn dagegen der Stromkreis eine Zersetzungszone enthält, in welcher verdünnte Säure in Sauerstoff und Wasserstoff elektrolysiert wird, so ist die in dem Stromkreise pro Gramm des aufgelösten Zinks erzeugte Wärme kleiner als früher und zwar um die Wärmemenge, welche erzeugt worden wäre, wenn die in der Zersetzungszone entwickelten Gase, Sauerstoff und Wasserstoff, sich verbunden hätten.

Oder, wenn der Stromkreis eine elektromagnetische Maschine enthält, welche benutzt wird, um Arbeit zu leisten, so ist die in dem Stromkreise erzeugte Wärme kleiner als sie dem verbrauchten Zink entspricht, und zwar um einen Betrag, der gleich der Wärme ist, welche erzeugt werden würde, wenn die von der Maschine geleistete Arbeit ganz in Reibung verbraucht werden würde.

190. Wenn die Anordnung eine derartige ist, daß die Größe der chemischen Wirkung ganz von der durchgesendeten Elektrizitätsmenge abhängt, so können wir die elektromotorische Kraft des Stromkreises auf folgende, zuerst von Thomson angegebene Weise bestimmen (Phil. Mag. Dez. 1851). Es werde der Widerstand des Stromkreises so groß gemacht, daß die durch den Strom in dem Elektrolyten erzeugte Wärme vernachlässigt werden kann. Es sei E die elektromotorische Kraft des Kreises; dann ist die Arbeit, die geleistet wird, um eine Elektrizitätseinheit durch den Strom zu treiben, dem Zahlenwerte nach gleich E . Aber während dieses Prozesses erleidet

ein elektrochemisches Äquivalent des Elektrolyten den chemischen Prozess, welcher in der Zelle vor sich geht. Wenn daher die während dieses Prozesses ausgegebene Energie ganz zur Unterhaltung des Stromes aufgewendet wird, so muß der dynamische Wert des Prozesses dem Zahlenwerte nach gleich E , der elektromotorischen Kraft des Kreises, sein, oder wie Thomson es ausspricht:

„Die elektromotorische Kraft eines elektrochemischen Vorganges ist im absoluten Maße gleich dem mechanischen Äquivalent der chemischen Wirkung auf ein elektrochemisches Äquivalent der Substanz.“

Beispiele.

191. Wenn die Wirkung in der Zelle teilweise aus nicht umkehrbaren Prozessen besteht, wie z. B.

- 1) Wärmeerzeugung durch elektrische Reibung infolge des Widerstandes in dem Elektrolyten;
- 2) Diffusion der primären oder sekundären Produkte der Elektrolyse durch den Elektrolyten, oder
- 3) irgend eine andere Wirkung, welche nicht umgekehrt wird, wenn die Richtung des Stromes die entgegengesetzte wird,

dann wird eine Zerstreuung der Energie in gewissem Grade stattfinden und die elektromotorische Kraft des Kreises wird kleiner sein als die Abnahme der inneren Energie, die der Elektrolyse eines elektrochemischen Äquivalents entspricht, verlangt.

Es darf nur der streng umkehrbare Prozess bei der Berechnung der elektromotorischen Kraft des Kreises berücksichtigt werden.

192. Die Bestimmung der ganzen elektromotorischen Kraft in einem elektrochemischen Kreise ist daher immer möglich. Wenn wir dagegen die bestimmten Punkte in dem Kreise bestimmen wollen, wo die verschiedenen Teile dieser elektromotorischen Kraft ausgeübt werden, so werden wir sehen, daß diese Untersuchung viel schwerer ist, als in dem Falle eines rein metallischen Kreises.

Denn die chemische Wirkung an der Berührungsstelle eines Metalls mit einem Elektrolyten ist im allgemeinen derart, daß sie nicht für sich allein stattfinden kann, d. h. ohne eine ihr äquivalente Wirkung, welche an der anderen Elektrode stattfindet. Wenn z. B. ein Strom zwischen Silberelektroden durch geschmolzenes Chlorsilber geht, so wird Chlor an der Anode frei, welches sofort auf die Elektrode wirkt, so daß es dort Chlorsilber bildet und Silber wird an der Kathode ausgeschieden.

Nun kennen wir die Größe der Wärmemenge, welche abgegeben wird, wenn ein Äquivalent freien Chlors sich mit einem Äquivalent

Silber verbindet und diese ist äquivalent der Energie, welche bei der Elektrolyse von Silberchlorid in freies Chlor und freies Silber aufgewendet werden muß; aber der Prozeß, der an der Anode stattfindet, ist die Verbindung von Silber nicht mit freiem Chlorgas, sondern mit Chlor in dem Zustande, wie es aus Silberchlorid elektrolysiert wird ¹⁾.

¹⁾ Die folgende Anmerkung ist ein Auszug aus einem Briefe Prof. Maxwells über das Potential, veröffentlicht in *Electrician*, 26. April 1879.

In einer Volta'schen Kette ist die Summe der elektromotorischen Kräfte vom Zink zum Elektrolyten, vom Elektrolyten zum Kupfer und vom Kupfer zum Zink, nicht Null, sondern sie ist das, was man die elektromotorische Kraft der Kette nennt, eine meßbare GröÙe. Von diesen drei elektromotorischen Kräften kann nur eine besonders durch einen glatten Prozeß gemessen werden, nämlich die vom Kupfer zum Zink.

Nun wurde durch thermoelektrische Experimente gefunden, daß diese elektromotorische Kraft für gewöhnlich äußerst gering ist, kleiner als ein Mikrovolt, und daß sie in der Richtung vom Zink zum Kupfer wirkt.

Folglich kann der aus Experimenten, bei welchen das dritte Medium Luft ist, gezogene Schluß, daß die elektromotorische Kraft vom Kupfer zum Zink 0,75 Volt. beträgt, nicht richtig sein. Faktisch ist das, was wir wirklich messen, die Differenz zwischen dem Potential in der Luft nahe an der Oberfläche des Kupfers und dem Potential in der Luft nahe an der Oberfläche des Zinks, während Zink und Kupfer in Kontakt sind. Die Zahl 0,75 ist daher die elektromotorische Kraft, in Volts, der Kette, Kupfer, Zink, Luft, Kupfer und ist die Summe von drei elektromotorischen Kräften, von denen bis jetzt nur eine gemessen worden ist.

Herr J. Brown hat durch die Methode der getrennten Kreise von Sir W. Thomson gezeigt (*Phil. Mag.*, Aug. 1878, p. 142), daß, während Kupfer in Luft negativ gegen Eisen ist, es in Schwefelwasserstoff positiv gegen Eisen ist.

Es scheint daher, daß der Grund, warum die Resultate der Vergleichung der Metalle durch die gewöhnlichen „Kontaktkraft“-Experimente so gut mit ihrer Vergleichung stimmen, wenn man beide Metalle in Wasser oder einen oxydierenden Elektrolyten taucht, nicht der ist, daß die elektromotorische Kraft zwischen einem Metalle und einem Gase oder einem Elektrolyten klein ist, sondern daß die Eigenschaften der Luft in gewissem Grade mit denen von oxydierenden Elektrolyten übereinstimmen, denn wenn die wirkende Komponente des Elektrolyten Schwefel ist, so sind die Resultate ganz verschieden und dieselbe Art von Verschiedenheit tritt ein, wenn Schwefelwasserstoff an Stelle der Luft genommen wird.

Wir wissen so wenig über die Natur der Ionen, wie sie in einem Elektrolyten existieren, daß, selbst wenn wir die Menge der erzeugten oder absorbierten Wärme messen könnten, wenn eine Elektrizitätseinheit von einem Metall zu einem Elektrolyten oder von einem Elektrolyten zu einem Metall geht, wir daraus doch nicht den Wert der elektromotorischen Kraft von dem Metall zum Elektrolyten bestimmen könnten.

Wenn dies bei flüssigen Elektrolyten der Fall ist, so haben wir noch weniger Hoffnung, die elektromotorische Kraft von einem Metalle zu einem Gase zu bestimmen; denn wir können nicht einen Strom von dem einen zum andern ohne tumultuarische und nicht umkehrbare Wirkungen hervorbringen, wie Zerstäubung des Metalls und heftige Bewegung des Gases durch diskontinuierliche Entladung.

Über konstante Volta'sche Elemente.

193. Wenn mit einer Volta'schen Batterie, in welcher Polarisation herrscht, eine Zeit lang gearbeitet worden ist, so nimmt während der Zeit, in welcher der Strom nicht fließt, die Polarisation ab, so daß, wenn der Strom wieder zu fließen anfängt, seine Stärke größer ist, als wenn er eine Zeit lang geflossen ist. Wenn anderseits der Widerstand des Stromkreises verringert wird, indem man ihn durch einen kurzen Schließungsdraht fließen läßt, so ist der Strom, wenn man ihn wieder durch den gewöhnlichen Stromkreis fließen läßt, zu Anfang schwächer als er gewöhnlich ist, infolge der größeren Polarisation, die durch Anwendung des kurzen Stromschlusses hervorgebracht wird.

Um sich von diesen Unregelmäßigkeiten in der Stromstärke frei zu machen, welche bei Experimenten, die genaue Messungen verlangen, außerordentlich störend ist, ist es notwendig, die Polarisation zu beseitigen oder sie wenigstens so viel wie möglich zu verringern.

An der Oberfläche einer Zinkplatte, die in eine Lösung von Zinksulfat oder in verdünnte Schwefelsäure eingetaucht ist, scheint keine starke Polarisation vorhanden zu sein. Der Hauptsitz der Polarisation ist an der Oberfläche des negativen Metalls. Wenn die Flüssigkeit, in welche das negative Metall eingetaucht ist, verdünnte Schwefelsäure ist, so sieht man, daß das Metall mit Bläschen von Wasserstoffgas bedeckt wird, die durch die elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeit entstehen. Natürlicherweise verringern diese Bläschen, indem sie die Flüssigkeit hindern das Metall zu berühren, die Berührungsfläche und vermehren den Widerstand des Stromkreises. Aber sicherlich ist außer diesen sichtbaren Bläschen noch eine dünne Schicht von Wasserstoff, wahrscheinlich nicht in freiem Zustande, vorhanden, die an dem Metalle anhaftet, und da wir gesehen haben, daß diese Schicht im Stande ist, eine elektromotorische Kraft in der umgekehrten Richtung hervorzubringen, so muß sie natürlich die elektromotorische Kraft der Batterie verkleinern.

Verschiedene Mittel wurden angewendet, um diese Wasserstoffschicht wegzuschaffen. Sie kann in gewissem Grade verringert werden durch mechanische Mittel, z. B. durch Rühren der Flüssigkeit oder durch Reiben der Oberfläche der negativen Platte. In der Smee'schen Batterie sind die negativen Platten vertikal und mit fein vertheiltem Platin bedeckt, aus welchem die Wasserstoffblasen leicht entweichen; bei ihrem Aufsteigen rufen sie einen Flüssigkeitsstrom hervor, welcher andere Blasen, sowie sie gebildet werden, mit fortnimmt.

Eine weit wirksamere Methode hingegen beruht auf der Anwendung chemischer Mittel. Von solchen gibt es zwei Arten. In den Batterien von Grove und Bunsen taucht die negative Platte in eine sauerstoffreiche Flüssigkeit, und der Wasserstoff verbindet sich mit diesem Sauerstoff, statt daß er eine Schicht an der Platte bildet. In Grove's Batterie ist diese Platte eine Platinplatte, die in konzentrierte Salpetersäure taucht. In Bunsens erster Batterie besteht sie aus Kohle ebenfalls in Salpetersäure. Chromsäure wird zu demselben Zweck auch gebraucht und hat den Vorteil, daß sie frei von den Säuredämpfen ist, die durch Reduktion der Salpetersäure entstehen.

Eine andere Art und Weise, sich von dem Wasserstoff zu befreien, ist die, daß man Kupfer als negatives Metall anwendet und die Oberfläche mit einer Oxydschicht bedeckt. Diese verschwindet jedoch sehr rasch, wenn sie als negative Elektrode benutzt wird. Um sie zu erneuern, hat Joule vorgeschlagen, die Kupferplatten in der Form von Scheiben anzuwenden, die halb in die Flüssigkeit eintauchen, und sie langsam rotieren zu lassen, so daß die Luft auf die bei der Drehung ihr ausgesetzten Teile wirken kann.

Die andere Methode besteht darin, daß man als Flüssigkeit einen Elektrolyten anwendet, dessen Kation ein stärker negatives Metall als das Zink ist.

In der Daniellschen Batterie taucht eine Kupferplatte in eine gesättigte Lösung von Kupfersulfat. Wenn der Strom vom Zink zum Kupfer durch die Lösung fließt, so erscheint nicht Wasserstoff an der Kupferplatte, sondern es wird Kupfer an ihr abgeschieden. Wenn die Lösung gesättigt ist und der Strom nicht zu stark ist, so scheint das Kupfer als wirkliches Kation aufzutreten, während das Anion, SO_4 , zum Zink geht.

Wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, so entwickelt sich Wasserstoff an der Kathode, wirkt aber sofort auf die Lösung, treibt das Kupfer aus und verbindet sich mit SO_4 zu Schwefelsäure. Wenn dies der Fall ist, so wird das Kupfersulfat an der Kupferplatte durch Schwefelsäure ersetzt, die Flüssigkeit wird farblos und es findet wieder Polarisation durch Wasserstoffgas statt. Das auf diese Weise ausgeschiedene Kupfer hat eine lockerere und bröcklichere Struktur als das durch wirkliche Elektrolyse abgeschiedene.

Um gewiß zu sein, daß die mit dem Kupfer in Berührung stehende Flüssigkeit mit Kupfersulfat gesättigt ist, müssen Krystalle dieses Salzes in die Flüssigkeit an das Kupfer gelegt werden, so daß, wenn die Lösung durch Abscheidung des Kupfers schwach geworden ist, mehr von den Krystallen aufgelöst werden kann.

Wir haben gesehen, daß es notwendig ist, daß die Flüssigkeit am Kupfer mit Kupfersulfat gesättigt ist. Es ist noch notwendiger, daß die Flüssigkeit, in welche das Zink eingetaucht ist, frei von

Kupfersulfat ist. Wenn etwas von diesem Salz an die Oberfläche des Zinks gelangt, wird es reduziert und Kupfer scheidet sich an dem Zink ab. Zink, Kupfer und Flüssigkeit bilden dann einen kleinen Kreis, in welchem starke elektrolytische Aktion vor sich geht, und das Zink wird durch eine Wirkung verzehrt, die nichts zu dem Nutzeffekt der Batterie beiträgt.

Um dies zu verhindern, wird das Zink entweder in verdünnte Schwefelsäure oder in eine Lösung von Zinksulfat getaucht, und um zu verhindern, daß die Lösung von Kupfersulfat sich mit dieser Flüssigkeit mischt, werden die beiden Flüssigkeiten durch eine Trennungsfläche geschieden, die aus porösem Thon oder aus einer Blase bestehen kann, welche wohl die Elektrolyse durch sich hindurch gestattet, aber die Mischung der Flüssigkeiten durch sichtbare Ströme wirksam verhindert.

In einigen Battereien werden Sägespäne verwendet, um diese Strömungen zu verhindern. Indes zeigen die Experimente von Graham, daß der Diffusionsprozeß beinahe ebenso rasch vor sich geht, wenn die beiden Flüssigkeiten durch ein derartiges Trennungsmittel geschieden sind, als wenn sie in direkter Berührung sind, bloß daß keine sichtbare Strömungen vorhanden sind, und es ist wahrscheinlich, daß, wenn eine Scheidewand angewendet wird, welche die Diffusion vermindert, daß dann in genau demselben Verhältnis der Widerstand des Elements zunehmen wird, da elektrolytische Leitung ein Vorgang ist, dessen mathematische Gesetze dieselbe Form haben, wie die der Diffusion, und was dem einen Vorgang entgegenwirkt, muß in gleicher Weise dem andern entgegenwirken. Der einzige Unterschied ist der, daß die Diffusion stets vor sich geht, während der Strom bloß fließt, wenn die Batterie in Wirksamkeit ist.

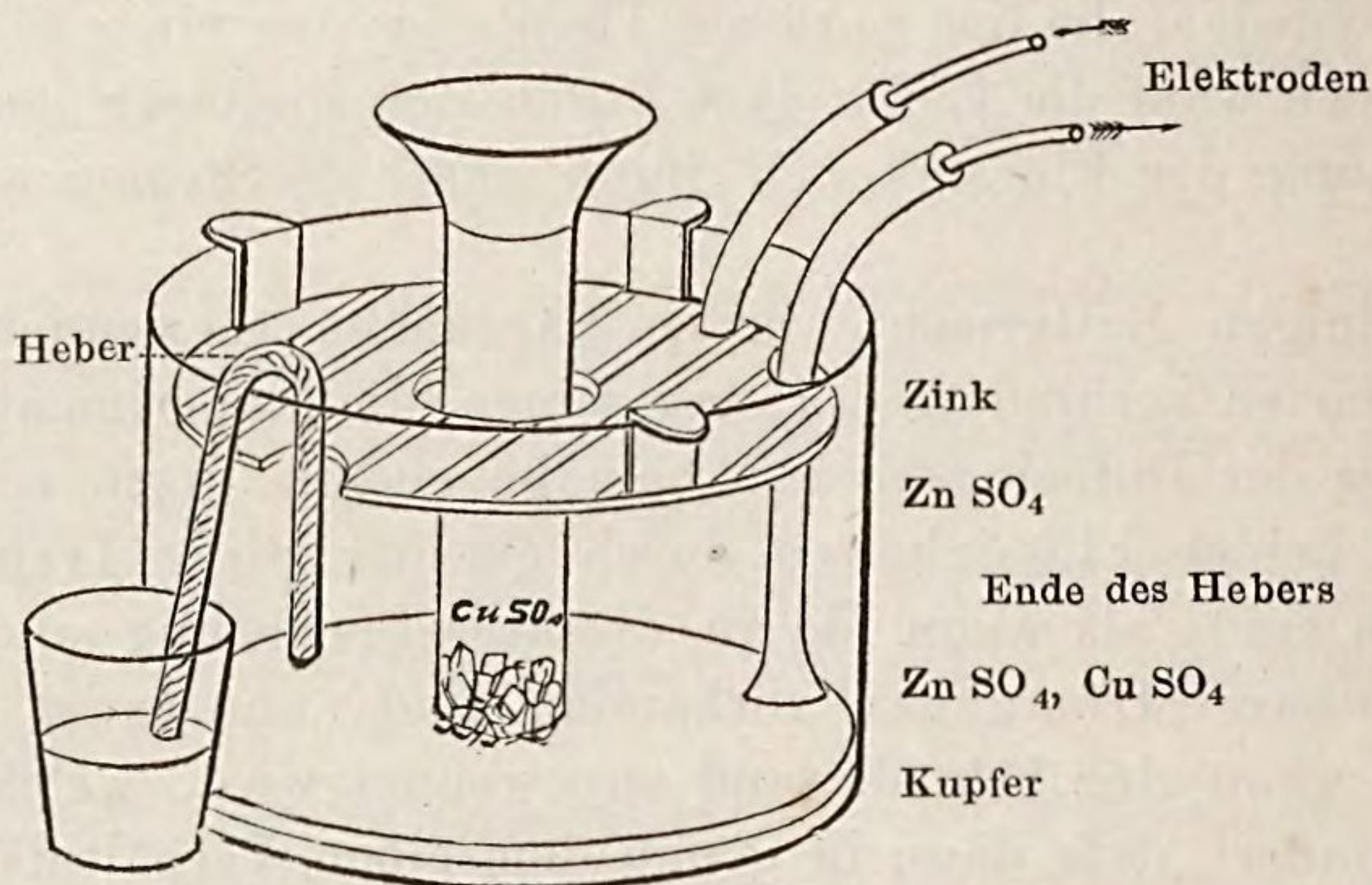
In allen Formen der Daniellschen Batterie ist das Endresultat, daß das Kupfersulfat seinen Weg zum Zink findet und die Batterie zerstört. Um dieses Resultat beliebig lang hinauszuschieben, hat Sir W. Thomson¹⁾ die Daniellsche Batterie in der in Fig. 41 (a. f. S.) gezeichneten Form konstruiert.

In jedem Element liegt die Kupferplatte horizontal am Boden, und eine gesättigte Lösung von Zinksulfat ist über sie gegossen. Das Zink hat die Form eines Gitters und ist horizontal nahe an die Oberfläche der Flüssigkeit gelegt. Eine Glasröhre steht vertikal in der Lösung mit ihrem unteren Ende gerade über der Oberfläche der Kupferplatte. Krystalle von Kupfersulfat werden in diese Röhre hineingelegt und diese bilden, wenn sie sich in der Flüssigkeit auflösen, eine Lösung von größerer Dichte, als die des Zinksulfats allein ist, so daß die Kupferlösung zum Zink nur durch Diffusion gelangen kann. Um diesen

¹⁾ Proc. R. S., 19. Jan. 1871.

Diffusionsprozefs zu verzögern, ist ein mit Baumwolle gefüllter Heber so angebracht, dafs eins seiner Enden mitten zwischen dem Zink und dem Kupfer ist und das andere in ein Gefäfs aufserhalb des Elements taucht, so dafs die Flüssigkeit nahezu aus der Mitte ihrer Höhe sehr langsam hinabgezogen wird. Um ihren Platz auszufüllen, wird Wasser oder eine schwache Zinksulfatlösung, wenn nötig, oben zugegossen. Auf diese Weise wird der gröfste Teil des Kupfersulfats, das durch die Flüssigkeit infolge der Diffusion aufsteigt, von dem Heber herab-

Fig. 41.



gezogen, bevor er das Zink erreicht, und das Zink ist mit einer von Kupfersulfat nahezu freien Flüssigkeit umgeben, die auch eine sehr langsame Bewegung nach unten in dem Elemente hat, wodurch sie die aufwärts gehende Bewegung des Kupfersulfats noch mehr hindert. Während der Wirkung der Batterie lagert sich Kupfer auf der Kupferplatte ab und SO_4 geht langsam durch die Flüssigkeit zum Zink, mit dem es sich zu Zinksulfat verbindet. Dadurch wird die Flüssigkeit am Boden infolge der Abscheidung des Zinks weniger dicht, und die Flüssigkeit oben wird durch die Hinzufügung von Zink dichter. Um diese Wirkung der veränderten Ordnung in der Dichtigkeit der Schichten, die einen unstabilen Zustand und sichtbare Strömungen in dem Gefäße hervorbringen würden, zu verhindern, muß man dafür sorgen, dafs die Röhre gut mit Kupfersulfatkrystallen versehen gehalten wird, und dafs das Element oben mit einer Zinksulfatlösung versorgt wird, die hinreichend verdünnt ist, um leichter zu sein als irgend eine andere Schicht der Flüssigkeit im Element.

Die Daniell'sche Batterie ist durchaus nicht die stärkste von den gewöhnlich gebrauchten. Die elektromotorische Kraft eines Groveschen Elements ist 192 000 000, die eines Daniell'schen 107 900 000, und die eines Bunsenschen 188 000 000.

Der Widerstand eines Daniellschen Elements ist im allgemeinen gröfser als der eines Groveschen oder Bunsenschen von derselben Gröfse.

Diese Mängel werden jedoch in allen Fällen, wo genaue Messungen verlangt werden, mehr als aufgewogen durch den Umstand, daß ein Daniellsches Element alle anderen bekannten Vorrichtungen in bezug auf Konstanz der elektromotorischen Kraft übertrifft. Es hat auch den Vorteil, lange Zeit im arbeitenden Zustande bleiben zu können und endlich den, daß es kein Gas ausfendet.

Elftes Kapitel.

Methoden zur Unterhaltung eines elektrischen Stromes.

194. Die hauptsächlichsten Mittel, um einen stationären elektrischen Strom dauernd zu erhalten, bestehen in der Anwendung

- 1) Der Reibungselektrisiermaschine.
- 2) Der Voltaschen Batterie.
- 3) Der thermo-elektrischen Batterie.
- 4) Der magnet-elektrischen Maschine.

1. Die Reibungselektrisiermaschine.

195. Die Elektrizität wird hierbei zwischen den Oberflächen von zwei verschiedenen Substanzen erzeugt, wie z. B. von Glas und Zinnamalgam oder Ebonit und Pelz. Während der Bewegung der Maschine wird eine dieser elektrischen Flächen vor der andern vorbeigeführt und dann läßt man beide ihre Elektrizität in die Elektroden der Maschine entladen, von denen aus der Strom dann in einem beliebigen Stromkreise fließt.

Bei den Maschinen der gewöhnlichen Form läßt man eine kreisrunde Glasscheibe oder einen Glascylinder sich um die Achse drehen. Nehmen wir an, der sich bewegende Teil sei eine Glasscheibe. Das Reibzeug ist so befestigt, daß es gegen die Oberfläche der Scheibe drückt, wenn diese rotiert. Die Oberfläche des Reibzeugs besteht aus Leder, welches mit Zinnamalgam bestrichen ist. Durch die Reibung zwischen dem Glas und dem Amalgam wird die Oberfläche des Glases positiv elektrisch, die des Reibzeuges negativ. Wenn sich die Scheibe dreht, wird die elektrisierte Oberfläche des Glases von dem Reibzeug weggeführt und ein anderer Teil der Oberfläche des Glases,

ein Teil, der vorher unelektrisch war, wird zwischen das Reibzeug gebracht, um elektrisiert zu werden. So lange die entgegengesetzt elektrisierten Flächen des Glases und des Reibzeugs in Kontakt bleiben, sind die elektrischen Wirkungen auf die Umgebung sehr klein, aber wenn das Glas von dem Reibzeug entfernt wird, werden starke elektrische Kräfte entwickelt. Das Potential des Reibzeugs wird negativ, und da das Reibzeug durch das Amalgam gut leitend ist, so wird seine Elektrizität sofort zu der negativen Elektrode hingeschafft. Zu gleicher Zeit bekommt das elektrisierte Glas ein hohes positives Potential, aber da das Glas eine isolierende Substanz ist, gibt es nicht so leicht seine Elektrizität ab. Die positive Elektrode ist daher mit einem Kamm versehen, der aus einer Anzahl von scharfen Metallspitzen besteht, die bis nahe an die elektrisierte Fläche des Glases reichen. Da das Potential der Oberfläche des Glases viel höher ist als das des Kammes, so findet eine starke Anhäufung von negativer Elektrizität an der Spitze des Kammes statt und diese erzeugt ein negatives Glimmlicht, zusammen mit einem elektrischen Wind, der von dem Kamme zum Glase weht. Die negativ elektrischen Teilchen der Luft verbreiten sich über die positiv elektrisierte Oberfläche des Glases und bewirken, daß die Oberfläche des Glases entladen wird. Es ist jedoch möglich, daß ein Teil von ihnen mit dem Glase herumgeführt wird, bis sie von dem Reibzeug abgewischt werden, obwohl ich nicht im Stande war, experimentell darüber Gewißheit zu erlangen.

So bringt die Rotation der Maschine die positive Elektrizität der Oberfläche des Glases von dem Reibzeug zum Kamme und der negative elektrische Wind vom Kamme neutralisiert entweder die positiv elektrisierte Oberfläche oder wird mit dieser bis zu dem Reibzeug geschafft, so daß ein beständiger Strom von positiver Elektrizität von dem Reibzeug zum Kamme unterhalten wird, oder, was dasselbe ist, ein Strom von negativer Elektrizität von dem Kamme zum Reibzeug, oder, da es indifferent ist, wie wir dieses Faktum ausdrücken, können wir es, wenn wir wollen, als einen positiven Strom in der einen Richtung zusammen mit einem negativen Strom in der andern Richtung beschreiben, wobei die arithmetische Summe dieser beiden gedachten Ströme der wirkliche beobachtete Strom ist. Die Wirkung der Maschine hängt also ab von der Elektrisierung der Glasoberfläche durch das Reibzeug, von der Fortführung dieser Elektrisierung zu dem Kamme durch die Bewegung der Maschine und endlich von der Entladung der Elektrizität durch den Kamm.

196. Die Stärke des erzeugten Stromes hängt von der Oberflächendichtigkeit der Elektrizität, von dem Flächeninhalt der elektrisierten Oberfläche und von der Zahl der Umdrehungen in einer Minute ab.

Die elektromotorische Kraft der Maschine ist der Überschufs des Potentials am Kamm über das am Reibzeug. Das bequemste Maß für die elektromotorische Kraft einer Maschine ist die Länge der Funken, welche sie gibt.

Während die elektrisierte Fläche vom Reibzeug zum Kamm übergeht, geht sie von Stellen niederen zu Stellen höheren Potentials, und es wirkt daher auf sie eine Kraft in einer Richtung, die der ihrer Bewegung entgegengesetzt ist. Die bei der Drehung der Maschine geleistete Arbeit übertrifft daher die Arbeit, welche notwendig ist, um die Reibung des Reibzeuges, der Achse und anderer mechanischer Widerstände zu überwinden, um die Arbeit, welche geleistet wird, um Elektrizität von dem Reibzeug zum Kamm zu schaffen.

In jedem Punkte ihres Weges wirkt auf die Elektrizität an der Oberfläche der Glasscheibe eine Kraft, deren Gröfse durch das Verhältnis gemessen wird, in welchem das Potential von einem Punkte der Oberfläche zum andern variiert. Wenn diese Kraft einen gewissen Wert übersteigt, so wird sie bewirken, daß die Elektrizität längs der Oberfläche der Scheibe gleitet, und dies wird unter der Wirkung einer viel kleineren Kraft stattfinden, als die ist, welche erforderlich ist, um die Elektrizität von der Oberfläche zu entfernen. Diese Entladung längs der Oberfläche der Scheibe kann man sehen, wenn man die Maschine in einem dunkeln Raume dreht und es ist klar, daß soviel Elektrizität, als da rückwärts gleitet, von dem Hauptstrom der Maschine verloren geht.

Um die Maschine mit dem größten Nutzen arbeiten zu lassen, muß das Rückwärtsgleiten der Elektrizität verhindert werden. Das Rückwärtsgleiten findet immer statt, wenn das Verhältnis der Änderung des Potentials von Punkt zu Punkt der Oberfläche einen gewissen Wert überschreitet. Wenn durch irgend eine Verteilung der Elektrizität das Verhältnis der Variation des Potentials gerade unter diesen Wert gehalten werden kann und zwar überall vom Reibzeug bis zum Kamme, dann wird die elektromotorische Kraft der Maschine ihren größtmöglichen Wert haben.

Bei den meisten elektrischen Maschinen werden Stücke von Wachstaflet an dem Reibzeuge befestigt, so daß, wenn die Scheibe sich dreht, die elektrisierte Oberfläche, sobald sie das Reibzeug verläßt, mit dem Wachstaflet bedeckt ist, welcher sich vom Reibzeug bis beinahe zum Kamm erstreckt. Diese Taffetstücke werden negativ elektrisch und haften deshalb von selbst an der Oberfläche des Glases. Wenn während der Umdrehung der Scheibe das Verhältnis der Zunahme der Potentiale so groß wird, daß ein Rückwärtsgleiten der Elektrizität eintritt, so neutralisiert die positive Elektrizität, welche so rückwärts gleitet, einen Teil der negativen Elektrizität des Taffetstückes und vergrößert so das elektrische Potential gerade hinter der Stelle, wo

das Gleiten stattfand. Auf diese Weise wird der Abfall des elektrischen Potentials ausgeglichen und die elektromotorische Kraft der Maschine steigt zu ihrem größtmöglichen Wert, so daß sie die längsten Funken gibt, welche eine Maschine von gegebenen Dimensionen liefern kann.

Wenn die Wachstaffetstücke entfernt werden, so wird der Abfall des Potentials viel größer an dem Reibzeug als an jeder andern Stelle, die Elektrizität gleitet an dem Glase gerade da, wo es das Reibzeug verläßt, zurück und sehr wenig Elektrizität und diese noch von verhältnißmäßig niedrigem Potential erreicht den Kamm.

In den besten Maschinen, in welchen der Abfall des Potentials vom Reibzeug zum Kamm gleichmäßig ist, muß die Länge des Funkens hauptsächlich von dem Abstände zwischen Reibzeug und Kamm abhängen. Daher wird eine Maschine wie die Wintersche, bei der Reibzeug und Kamm an den entgegengesetzten Enden eines Durchmessers der Scheibe sitzen, einen längeren Funken geben, als eine Maschine, welche denselben Scheibendurchmesser hat, aber welche, wie die von Cuthbertson, zwei Reibzeuge und zwei Kämmen hat, so daß der Abstand zwischen jedem Reibzeuge und seinem Kamme ein Quadrant ist.

Über Maschinen, die Elektrizität durch mechanische Arbeit hervorbringen.

197. Bei der gewöhnlichen Reibungselektrisiermaschine ist die zur Überwindung der Reibung aufgewendete Arbeit weit größer als die zur Zunahme der Elektrizität aufgewendete. Daher ist jede Einrichtung, durch welche die Elektrizität ganz durch mechanische Arbeit gegen die elektrischen Kräfte hervorgebracht wird, von wissenschaftlicher Wichtigkeit, wenn nicht auch von praktischem Wert. Die erste Maschine dieser Art scheint Nicholsons Revolving Doubler gewesen zu sein, die in *Philosophical Transactions* für 1788 beschrieben ist, als „ein Instrument, welches durch Drehung einer Kurbel die beiden Arten der Elektrizität erzeugt, ohne Reibung und ohne Ableitung zur Erde“.

198. Durch den Revolving Doubler war es Volta möglich, aus der Elektrizität der Säule eine Elektrizitätsmenge zu entwickeln, welche im Stande war, sein Elektrometer zu beeinflussen. Instrumente nach demselben Prinzip wurden unabhängig von C. F. Varley¹⁾ und Sir W. Thomson erfunden.

¹⁾ Specification of Patent, 27. Jan. Nr. 206.

Diese Instrumente bestehen im Wesentlichen aus isolierten Leitern von verschiedenen Formen, theils feststehenden, theils beweglichen. Die beweglichen Leiter werden Übertrager genannt und die feststehenden können beziehungsweise Induktoren, Empfänger und Regeneratoren genannt werden. Diese Induktoren und Empfänger sind so geformt, daß, wenn die Übertrager bei ihrer Umdrehung an gewisse Punkte kommen, sie fast vollständig von einem leitenden Körper umgeben sind. Da die Induktoren und Empfänger nicht vollständig den Übertrager umgeben und ihm zu gleicher Zeit gestatten können, sich frei hinein und heraus zu bewegen, ohne daß ein kompliziertes Arrangement von beweglichen Teilen angebracht werden müßte, so ist das Instrument theoretisch nicht vollkommen ohne ein paar Regeneratoren, welche die geringe Menge von Elektrizität aufspeichern, welche die Übertrager zurückbehalten, wenn sie aus den Empfängern austreten.

Für unsern gegenwärtigen Zweck aber können wir annehmen, daß die Induktoren und Empfänger den Übertrager vollständig einschließen, wenn er in ihnen ist, in welchem Falle die Theorie sehr vereinfacht wird.

Wir wollen annehmen, die Maschine bestehe aus zwei Induktoren A und C und aus zwei Empfängern B und D mit zwei Übertragern F und G .

Nehmen wir an, der Induktor A sei positiv elektrisiert, so daß sein Potential A ist und der Übertrager F befinde sich in ihm und habe das Potential F . Wenn dann Q der Koeffizient der Induktion (positiv genommen) zwischen A und F ist, so wird die Elektrizitätsmenge auf dem Übertrager $Q(F - A)$ sein.

Wenn der Übertrager, während er in dem Induktor ist, mit der Erde in Verbindung gesetzt wird, dann ist $F = 0$ und die Ladung auf dem Übertrager wird sein $-QA$, eine negative Gröfse. Nun werde der Übertrager weiter geführt, bis er in dem Empfänger B ist, und dort komme er in Kontakt mit einer Feder, so daß er in elektrischer Verbindung mit B ist. Er wird dann, wie wir in Artikel 20 sahen, vollständig entladen werden und seine ganze negative Ladung dem Empfänger B mittheilen.

Nun wird der Übertrager in den Induktor C eintreten, den wir negativ geladen annehmen wollen. Während er in C ist, wird er mit der Erde in Verbindung gesetzt und erlangt so eine positive Ladung, welche er wegführt und dem Empfänger D mittheilt und so weiter.

Auf diese Weise erhalten die Empfänger B und D , während die Potentiale der Induktoren immer konstant bleiben, der Reihe nach Ladungen, welche für jede Umdrehung des Übertragers dieselben sind, und so bringt jede Umdrehung einen gleichen Zuwachs der Elektrizität in den Empfängern hervor.

Setzt man aber den Induktor A mit dem Empfänger D in Verbindung und den Induktor C mit dem Empfänger B , so werden die Potentiale der Induktoren beständig zunehmen und die Menge der den Empfängern bei jeder Umdrehung mitgetheilten Elektrizität wird beständig wachsen.

Es sei zum Beispiel U das Potential von A und D , und V das von C und B und es sei, während der Empfänger innerhalb A ist, x die Ladung auf A und C und z die auf dem Übertrager, dann ist, da das Potential auf dem Empfänger Null ist, da er ja mit der Erde in Kontakt ist, seine Ladung $z = -Q U$. Der Übertrager tritt in B mit dieser Ladung ein und theilt sie B mit. Wenn B die Kapazität von B und C ist, so wird ihr Potential von V geändert sein in $V - \frac{Q}{B} U$.

Wenn der andere Übertrager zu derselben Zeit eine Ladung $-Q'V$ von C nach D geschafft hat, so wird er das Potential von A und D von U zu $U - \frac{Q'}{A} V$ ändern, wenn Q' der Induktionskoeffizient zwischen dem Übertrager und C , und A die Kapazität von A und D ist. Wenn daher U_n und V_n die Potentiale der beiden Induktoren nach n halben Umdrehungen sind und U_{n+1} und V_{n+1} die nach $n + 1$ halben Umdrehungen, so ist

$$U_{n+1} = U_n - \frac{Q'}{A} V_n,$$

$$V_{n+1} = V_n - \frac{Q}{B} U_n.$$

Setzen wir $p^2 = \frac{Q}{B}$ und $q^2 = \frac{Q'}{A}$, so finden wir

$$pU_{n+1} + qV_{n+1} = (pU_n + qV_n)(1 - pq) = (pU_0 + qV_0)(1 - pq)^{n+1},$$

$$pU_{n+1} - qV_{n+1} = (pU_n - qV_n)(1 + pq) = (pU_0 - qV_0)(1 + pq)^{n+1}.$$

Also ist

$$U_n = U_0 \left((1 - pq)^n + (1 + pq)^n \right) + \frac{q}{p} V_0 \left((1 - pq)^n - (1 + pq)^n \right),$$

$$V_n = \frac{p}{q} U_0 \left((1 - pq)^n - (1 + pq)^n \right) + V_0 \left((1 - pq)^n + (1 + pq)^n \right).$$

Aus diesen Gleichungen sieht man, daß die Gröfse $pU + qV$ beständig abnimmt, so daß, welches auch der Anfangszustand der Elektrisierung war, die Empfänger zuletzt entgegengesetzt elektrisiert sind, so daß die Potentiale von A und B im Verhältniß von q zu $-p$ stehen.

Andererseits nimmt die Gröfse $p U - q V$ beständig zu, so dafs, wie wenig auch $p U$ die Gröfse $q V$ zuerst übertreffen oder hinter ihr zurückbleiben mag, doch diese Differenz bei jeder Umdrehung in geometrischem Verhältniss wachsen wird, bis die elektromotorischen Kräfte so grofs werden, dafs die Isolation des Apparates überwunden wird.

Instrumente dieser Art können für verschiedene Zwecke benutzt werden:

- 1) Um eine grofse Menge Elektrizität von hohem Potential zu erzeugen, wie es durch die grofse Maschine von Varley geschieht.
- 2) Um die Ladung eines Kondensators auf einen gegebenen Wert zu bringen, wie in dem Falle von Thomson's Elektrometer, dessen Ladung durch einige wenige Umdrehungen einer sehr kleinen Maschine dieser Art, die dann Replenisher genannt wird, vergrößert oder verringert werden kann.
- 3) Um kleine Potentialdifferenzen zu vervielfältigen. Die Induktoren können zuerst auf einem außerordentlich geringen Potential sein, wie z. B. auf einem Potential, welches von einem thermoelektrischen Element herrührt; dann kann durch Drehung der Maschine die Potentialdifferenz fortwährend vergrößert werden, bis sie so grofs wird, dafs sie mit einem gewöhnlichen Elektrometer mefsbar ist. Bestimmt man durch das Experiment das verhältnismäßige Anwachsen dieser Differenz für jede Umdrehung der Maschine, so kann man die ursprüngliche elektromotorische Kraft, mit welcher die Induktoren geladen waren, aus der Anzahl der Umdrehungen und der schließlichen Elektrisierung ableiten.

Bei den meisten von diesen Maschinen läfst man die Übertrager sich um eine Achse drehen und bringt sie so durch Drehung einer Achse in die passenden Stellen gegen die Induktoren. Die Verbindungen werden durch Federn bewerkstelligt, die so angebracht sind, dafs die Übertrager im geeigneten Moment mit ihnen in Berührung kommen.

199. Sir W. Thomson¹⁾ dagegen hat eine Maschine zur Multiplikation elektrischer Ladungen konstruiert, in welcher die Übertrager Wassertropfen sind, die aus dem Innern eines Induktors auf einen isolierten Empfänger fallen. Der Empfänger wird so fortwährend mit einer Ladung versehen, die das entgegengesetzte Zeichen hat als die des Induktors. Wenn der Induktor positiv elektrisiert ist, wird der Empfänger eine allmählich wachsende Ladung von negativer Elektrizität erhalten.

¹⁾ Proc. R. S., 20. Juni 1867.

Das Wasser läßt man von dem Empfänger durch einen Trichter abfließen, dessen Mündung fast ganz von dem Metall des Empfängers umgeben ist. Die von dieser Mündung fallenden Tropfen sind daher nahezu frei von Elektrizität. Ein anderer Induktor und ein anderer Empfänger von derselben Konstruktion sind so aufgestellt, daß der Induktor des einen Systems mit dem Empfänger des andern in Verbindung ist. Die verhältnismäßige Zunahme der Ladung der Empfänger ist so nicht mehr konstant, sondern wächst in geometrischer Progression mit der Zeit, da die Ladungen der beiden Empfänger von entgegengesetzten Zeichen sind. Diese Zunahme geht so lange fort, bis die fallenden Tropfen so von ihrer Bahn durch die elektrische Einwirkung abgelenkt werden, daß sie außerhalb des Empfängers fallen oder gar den Induktor streifen.

In diesem Instrumente ist die Energie der Elektrisierung hergenommen von der Energie der fallenden Tropfen.

200. In der Holtzschen Influenzmaschine läßt man eine Scheibe von gefirnisstem Glas vor einer festen Scheibe von gefirnisstem Glas sich drehen. Die Induktoren bestehen aus zwei zugespitzten Stücken von Kartenblättern, die manchmal mit Zinnfolie belegt sind. Sie sind auf der hinteren Seite der festen Scheibe so angebracht, daß ihre Spitzen an entgegengesetzten Enden eines Durchmessers sich befinden. Aus der feststehenden Scheibe sind Löcher ausgeschnitten und zwar gerade an den Spitzen der Induktoren. Zuerst werden die Elektroden mit einander in Verbindung gebracht und die Maschine in Rotation versetzt. Dann wird einer der Induktoren elektrisiert, entweder durch eine gewöhnliche Maschine oder durch ein geriebenes Stück Ebonit. Nehmen wir an, er sei positiv elektrisiert. Der Kamm vor dem geladenen Induktor beginnt sofort Glimmlicht zu zeigen und entladet negative Elektrizität gegen die rotierende Scheibe. Diese negative Elektrizität wird von der Scheibe auf der andern Seite herumgeführt, wo sie frei von der Influenz des positiven Induktors ist. Der andere Induktor gibt nun positive Elektrizität von seiner Spitze ab und wird selbst negativ geladen, und der Kamm der negativen Elektrode gibt positive Elektrizität ab, welche durch die Scheibe auf die andere Seite zur positiven Elektrode herumgeführt wird. Auf diese Weise wird ein elektrischer Strom von der positiven zur negativen Elektrode unterhalten. Man hört einen rauschenden Ton und im Dunkeln sieht man ein Glimmlicht, welches sich vom positiven Kamm über die Oberflächen der rotierenden Scheibe hinerstreckt und zwar in derjenigen Richtung, die der Bewegung der Maschine entgegengesetzt ist. Werden jetzt die Elektroden allmählich getrennt, so gehen Funken hintereinander zwischen ihnen über.

Influenz - Maschine.

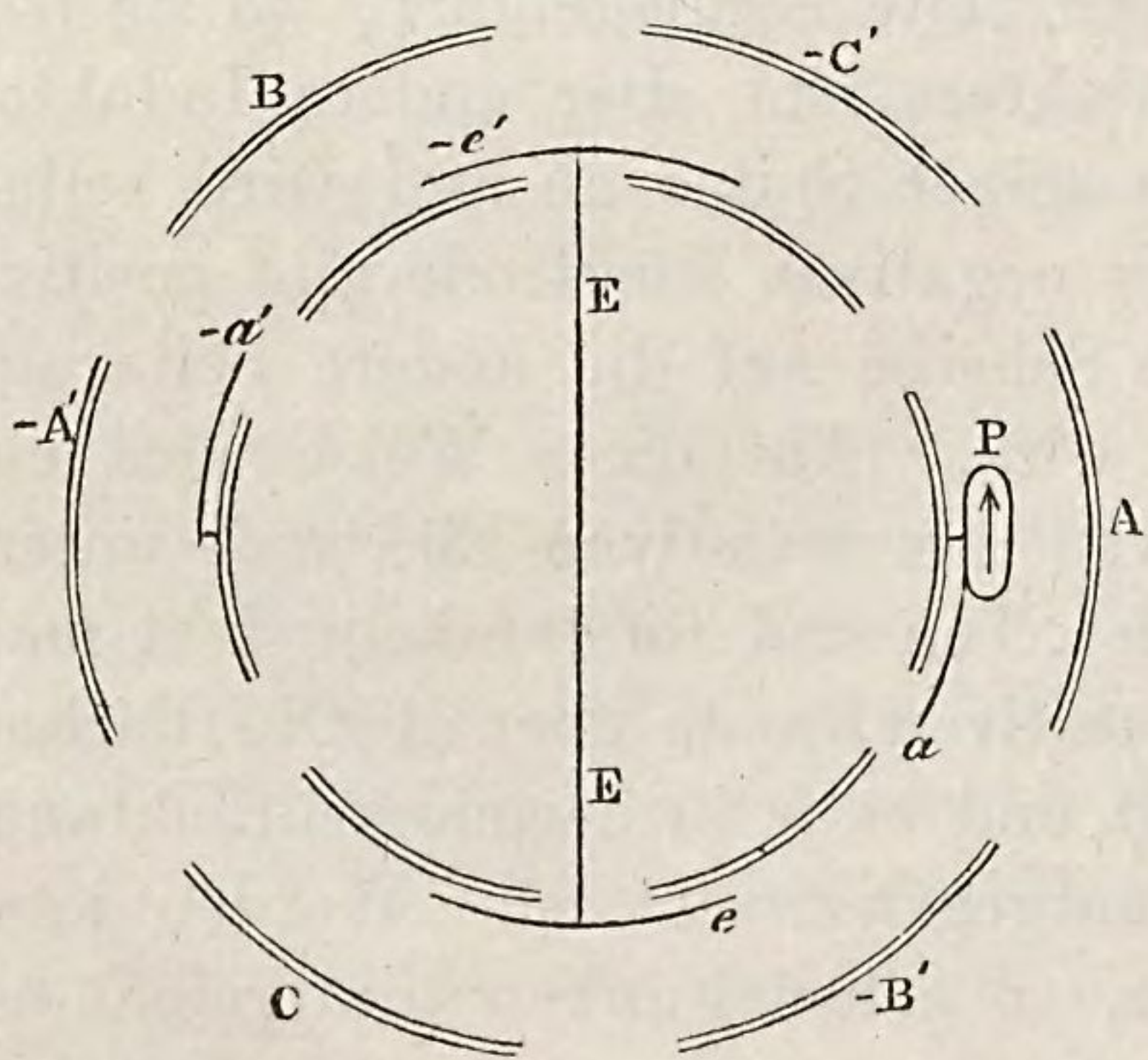
1865. Holtz präsentiert seine Maschine der Berliner Akademie, April 1865, 8 bis 10 cm Durchmesser.
1866. Töpler, Metallinduktoren, zwei metallische Übertrager auf einer Glasscheibe.
1867. Töplers vielfache Maschine, 8 rotierende Scheiben, 32 cm Durchmesser, Funken von 6 bis 9 cm.
1867. Holtz mit zwei entgegengesetzt rotierenden Scheiben.
1868. Kundt.
Carré, Induktorscheibe, 38 cm, induzierte 49 cm, Funken 15 bis 18 cm.

201. Bei den bisher beschriebenen Maschinen treten immer Funken auf, wenn der Übertrager in Berührung mit einem Leiter kommt, der ein von dem seinen verschiedenes Potential hat.

Nun haben wir gesehen, daß immer, wenn dies eintritt, ein Verlust an Energie stattfindet und daher wird die zum Drehen der Maschine aufgewendete Arbeit nicht ganz in Elektrizität in brauchbarer Form umgewandelt, sondern ein Teil wird zur Erzeugung der Wärme und des Geräusches des elektrischen Funkens verwendet.

Es schien mir daher wünschenswert, zu zeigen, wie eine elektrische Maschine konstruiert werden kann, welche dieser Verringerung der Wirksamkeit nicht unterworfen ist. Ich schlage das nicht als eine brauchbare Form der Maschine vor, sondern als ein Beispiel der Methode, durch welche die bei Wärmemaschinen Regenerator genannte Einrichtung auf eine elektrische Maschine angewendet werden kann, um Verlust von Arbeit zu verhüten.

Fig. 42.



In Figur 42 stellen A, B, C, A', B', C' feste, hohle Leiter dar, die so aufgestellt sind, daß der Übertrager P der Reihe nach in jeden von ihnen eintritt. Von diesen umhüllen A, A' und B, B' den Übertrager fast ganz, wenn er bei seinem Durchgange in ihrer Mitte ist, aber C, C' bedecken ihn nicht so vollständig.

Wir wollen annehmen, daß A, B, C mit einer Leydener Flasche von großer Kapazität verbunden sind, die auf dem Potential V ist, und daß A', B', C' mit einer andern Flasche von dem Potential $-V'$ verbunden sind.

P ist einer von den Übertragern, der sich in einem Kreise von A nach C' u. s. w. bewegt und auf seiner Bahn gewisse Federn berührt, von denen a und a' mit A respektive A' und e und e' mit der Erde verbunden sind.

Nehmen wir an, daß, wenn der Übertrager P in der Mitte von A ist, der Induktionskoeffizient zwischen P und A den Wert hat $-A$. Die Kapazität von P in dieser Stellung ist größer als A , da P nicht ganz von dem Empfänger A umgeben ist. Sie sei $A + a$.

Wenn dann U das Potential von P ist und V das von A , so wird die Ladung auf P sein $(A + a) U - A V$.

Nun sei P mit der Feder a in Kontakt, wenn es in der Mitte des Empfängers A ist, dann ist das Potential von P dasselbe wie das von A , nämlich V , und seine Ladung ist daher $a V$.

Wenn P nun die Feder a zu berühren aufhört, so führt es die Ladung $a V$ mit sich. Sobald P von A sich entfernt, verkleinert sich sein Potential und es wird noch kleiner, wenn P in den Influenzbereich von C' kommt, welches negativ elektrisiert ist.

Wenn der Induktionskoeffizient von P auf C gleich $-C'$ ist, wenn P nach C kommt, und seine Kapazität gleich $C' + c'$ ist, dann ist wenn U das Potential von P ist, die Ladung auf P

$$(C' + c') U + C' V' = a V.$$

Wenn

$$C' V' = a V$$

ist, dann wird an diesem Punkte U , das Potential von P , auf Null gebracht sein.

An diesem Punkte kommt P in Berührung mit der Feder e' welche mit der Erde in Verbindung ist. Da das Potential von P gleich dem der Feder ist, wird bei der Berührung kein Funken auftreten.

Dieser Konduktor C' , durch welchen der Übertrager in den Stand gesetzt wird, ohne einen Funken mit der Erde verbunden zu werden, entspricht der Einrichtung, welche bei Wärmemaschinen ein Regenerator genannt wird. Wir wollen ihn daher einen Regenerator nennen.

Nun bewege sich P weiter, immer noch in Kontakt mit der Erdableitung e' , bis es in die Mitte des Induktors B kommt, dessen Potential V ist. Ist $-B$ der Induktionskoeffizient zwischen P und B an diesem Punkte, dann wird, da $U = 0$ ist, die Ladung von P sein $-B V$.

Bewegt sich P von der Erdableitung fort, so führt es diese Ladung mit sich. Da es sich von dem positiven Induktor B zu dem negativen Empfänger A' hinbewegt, so wird sein Potential immer stärker negativ werden. An dem Mittelpunkt von A' würde, wenn P seine Ladung behält, sein Potential sein

$$- \frac{A' V' + B V}{A' + a'},$$

und wenn $B V$ gröfser als $a' V'$ ist, so wird das Potential dem numerischen Werte nach gröfser als das von V' sein. Es gibt daher einen Punkt auf dem Wege, bevor P den Mittelpunkt von A' erreicht, wo sein Potential $- V'$ ist. An diesem Punkte komme P in Kontakt mit der Feder a' , die zu dem negativen Empfänger führt. Ein Funke wird nicht auftreten, da die beiden Körper auf demselben Potential sind. Es bewege sich P weiter nach dem Mittelpunkte von A' hin, immer in Kontakt mit der Feder und daher auf demselben Potential, wie das von A' ist. Während dieser Bewegung teilt es A' eine negative Ladung mit. Am Mittelpunkte von A' trennt es sich von der Feder und führt eine Ladung $- a' V'$ mit sich zu dem positiven Regenerator C , wo sein Potential auf Null reduziert wird und es die nach der Erde gehende Feder e berührt. Dann schleift es längs der Feder in den negativen Induktor B' , erlangt während dieser Bewegung eine positive Ladung $B' V'$, welche es endlich dem positiven Empfänger A mitteilt, und der Zyklus von Operationen beginnt von Neuem.

Während dieses Zyklus hat der positive Empfänger eine Ladung $a V$ verloren und eine Ladung $B' V'$ gewonnen. Der ganze Gewinn an positiver Elektrizität ist daher

$$B' V' - a V.$$

Ebenso ist der gesamte Gewinn an negativer Elektrizität $B V - a' V'$.

Richtet man die Induktoren so ein, dafs sie möglichst nahe an der Oberfläche des Übertragers sind, so weit es mit der Isolation verträglich ist, so können B und B' grofs werden, und macht man die Empfänger so, dafs sie nahezu den Übertrager einschliessen, wenn er in ihnen ist, dann können a und a' sehr klein gemacht werden und dann werden die Ladungen beider Leydener Flaschen bei jeder Umdrehung vergrößert werden.

Die Bedingungen, welche von den Regeneratoren zu erfüllen sind, sind

$$C' V' = a V \quad \text{und} \quad C V = a' V'.$$

Da a und a' klein sind, so brauchen die Regeneratoren weder grofs, noch nahe an den Übertragern zu sein.

Coulombs Drehwage.

202. Eine grofse Anzahl der Experimente, durch welche Coulomb die Fundamentalgesetze der Elektrizität begründete, wurden so angestellt, dafs er die Kraft zwischen zwei kleinen mit Elektrizität geladenen Kugeln mafs, von denen die eine fest war, während die

andere durch zwei Kräfte im Gleichgewicht gehalten wurde, nämlich durch die elektrische Wirkung zwischen den beiden Kugeln und durch die Torsionselastizität eines Glasfadens oder eines Metalldrahtes.

Die Torsionswage besteht aus einem horizontalen Arm aus Hartgummi, der an einem feinen Drahte oder einem Glasfaden aufgehängt ist, und an einem Ende eine kleine schwach vergoldete Kugel aus Hollundermark trägt. Der Aufhängungsdraht ist oben an der vertikalen Achse eines Armes befestigt, welcher auf einem horizontalen mit Gradteilung versehenen Kreise bewegt werden kann, um das obere Ende des Drahtes durch eine beliebige Anzahl von vollständigen Umdrehungen tordieren zu können.

Der ganze Apparat ist in ein Gehäuse eingeschlossen. Eine andere kleine Kugel ist so auf einen isolierten Stiel aufgesetzt, daß sie geladen und durch eine Öffnung in das Gehäuse eingeführt werden kann, und zwar so, daß ihr Mittelpunkt in einen bestimmten Punkt des horizontalen Kreises zu liegen kommt, der von der aufgehängten Kugel beschrieben wird. Die Stellung der aufgehängten Kugel wird durch einen geteilten Kreis bestimmt, der auf dem cylindrischen Glasgehäuse des Instruments eingeritzt ist.

Nun nehmen wir an, daß beide Kugeln geladen sind und daß die aufgehängte Kugel in einer bestimmten Stellung im Gleichgewicht ist, so daß der Wagebalken der Drehwage einen Winkel ϑ mit dem durch die Mitte der festen Kugel gezogenen Radius bildet. Der Abstand der Kugelmittelpunkte ist dann $2a \sin \frac{1}{2} \vartheta$, wo a der Radius des Drehbalkens ist, und wenn F die Kraft zwischen den Kugeln ist, ist der Moment der Kraft um die Torsionsachse gleich $Fa \cos \frac{1}{2} \vartheta$.

Beide Kugeln mögen nun vollständig entladen werden und nun sei der Drehbalken im Gleichgewicht bei einem Winkel φ mit dem durch die feststehende Kugel gezogenen Radius.

Dann war der Winkel, um welchen die elektrische Kraft den Drehbalken gedreht hat, $\vartheta - \varphi$, und wenn M das Drehungsmoment der Torsionselastizität des Fadens ist, so werden wir die Gleichung haben:

$$Fa \cos \frac{1}{2} \vartheta = M (\vartheta - \varphi).$$

Wenn wir daher M bestimmen können, so können wir auch F , die wirkliche Kraft zwischen den Kugeln im Abstände $2a \sin \frac{1}{2} \vartheta$ bestimmen.

Um M , das Torsionsmoment, zu finden, sei I das Trägheitsmoment des Drehbalkens und T die Zeit einer Doppelschwingung des Balkens unter der Wirkung der Torsionselastizität, dann ist

$$M = \frac{1}{4\pi^2} I T^2.$$

Bei allen Elektrometern ist es von der größten Wichtigkeit, zu wissen, welche Kraft wir messen. Die auf die hängende Kugel wir-

kende Kraft rührt teilweise von der direkten Wirkung der festen Kugel, aber teilweise auch von der eventuellen Elektrisierung der Seiten des Gehäuses her.

Wenn das Gehäuse aus Glas ist, so ist es unmöglich, die Elektrisierung seiner Oberfläche anders als durch sehr schwierige Messungen an jedem Punkte zu bestimmen. Wenn dagegen das Gehäuse entweder ganz aus Metall gemacht ist, oder wenn ein metallisches Gehäuse, welches den Apparat fast ganz einschließt, als ein Schirm zwischen die Kugeln und das Glasgehäuse gestellt wird, so wird die Elektrizitätsverteilung auf der Innenseite des Metallschirmes ganz von der Elektrisierung der Kugeln abhängen und die Elektrizitätsverteilung auf dem Glasgehäuse wird keinen Einfluss auf die Kugeln haben. Auf diese Weise können wir jede Unbestimmtheit, die aus der Wirkung des Gehäuses sich ergeben würde, vermeiden.

Um dies durch ein Beispiel zu erläutern, bei welchem wir alle Wirkungen berechnen können, nehmen wir an, daß das Gehäuse eine Kugel von dem Radius b ist, daß der Punkt, um den sich der Drehbalken dreht, mit dem Mittelpunkt der Kugel zusammenfällt und daß a der Halbmesser des Drehbalkens ist. Ferner seien E_1 und E_2 die Ladungen auf den beiden Kugeln, der Winkel zwischen ihren Richtungen ϑ und es sei a_1 der Abstand der festen Kugel vom Mittelpunkt und r der Abstand zwischen den beiden kleinen Kugeln.

Vernachlässigen wir für den Augenblick den Einfluss der Induktion auf die Verteilung der Elektrizität auf den kleinen Kugeln, so wird die Kraft zwischen ihnen eine Abstossung sein

$$= \frac{E E_1}{r^2}$$

und das Drehungsmoment dieser Kraft um eine durch den Mittelpunkt gehende vertikale Achse wird sein

$$\frac{E E_1 a a_1 \sin \vartheta}{r^3}.$$

Das Bild von E in Bezug auf die Kugeloberfläche des Gehäuses ist ein Punkt auf demselben Radius im Abstände $\frac{b_2}{a_1}$ mit einer Ladung

$-\frac{E_1 b}{a_1}$ und das Drehungsmoment um die Aufhängungsachse, das von der Anziehung zwischen E und diesem Bilde resultiert, ist

$$\begin{aligned}
 & E E_1 \frac{b}{a_1} \frac{a \frac{b^2}{a_1} \sin \vartheta}{\left\{ a^2 - 2 \frac{a b^2}{a_1} \cos \vartheta + \frac{b^4}{a_1^2} \right\}^{\frac{3}{2}}} \\
 &= E E_1 \frac{a a_1 \sin \vartheta}{b^3 \left\{ 1 - 2 \frac{a a_1}{b^2} \cos \vartheta + \frac{a^2 a_1^2}{b^4} \right\}^{\frac{3}{2}}}.
 \end{aligned}$$

Wenn b , der Radius des kugelförmigen Gehäuses, groß gegen a und a_1 (die Abstände der Kugeln vom Mittelpunkte) ist, so können wir das zweite und dritte Glied des Faktors im Nenner vernachlässigen.

Das ganze Moment, welches den Drehungsbalken zu drehen sucht, läßt sich dann schreiben

$$E E_1 a a_1 \sin \vartheta \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{b^3} \right) = M (\vartheta - \varphi).$$

Elektrometer zur Messung von Potentialen.

203. In allen Elektrometern ist der bewegliche Teil ein mit Elektrizität geladener Körper und sein Potential ist verschieden von dem gewisser fester Teile um ihn herum. Wenn, wie bei der Coulombschen Methode, ein isolierter Körper mit einer gewissen Ladung angewendet wird, so ist diese Ladung das direkte Objekt der Messung. Wir können indes die Kugeln des Coulombschen Elektrometers durch feine Drähte mit verschiedenen Leitern in Verbindung setzen. Die Ladungen der Kugeln werden dann von den Werten der Potentiale auf diesen Leitern und von dem Potential auf dem Gehäuse des Instruments abhängen. Die Ladung auf jeder Kugel wird angenähert gleich sein ihrem Radius, multipliziert mit dem Überschuss ihres Potentials über das des Gehäuses des Instruments, falls die Radien der Kugeln klein sind gegen ihren gegenseitigen Abstand und gegen ihren Abstand von den Seiten oder der Öffnung des Gehäuses.

Coulombs Form des Apparats ist aber für Messungen dieser Art nicht sehr passend und zwar infolge der geringen Größe der Kraft zwischen den Kugeln, wenn diese in dem gewöhnlichen Abstände von einander sind und wenn die Differenz der Potentiale klein ist. Eine passendere Form ist die des „Plattenelektrometers“. Die ersten Elektrometer nach diesem Prinzip wurden von Sir W. Snow Harris¹⁾ konstruiert. Sie sind dann zu großer Vollendung, sowohl in Theorie als in Konstruktion, durch Sir W. Thomson²⁾ gebracht worden.

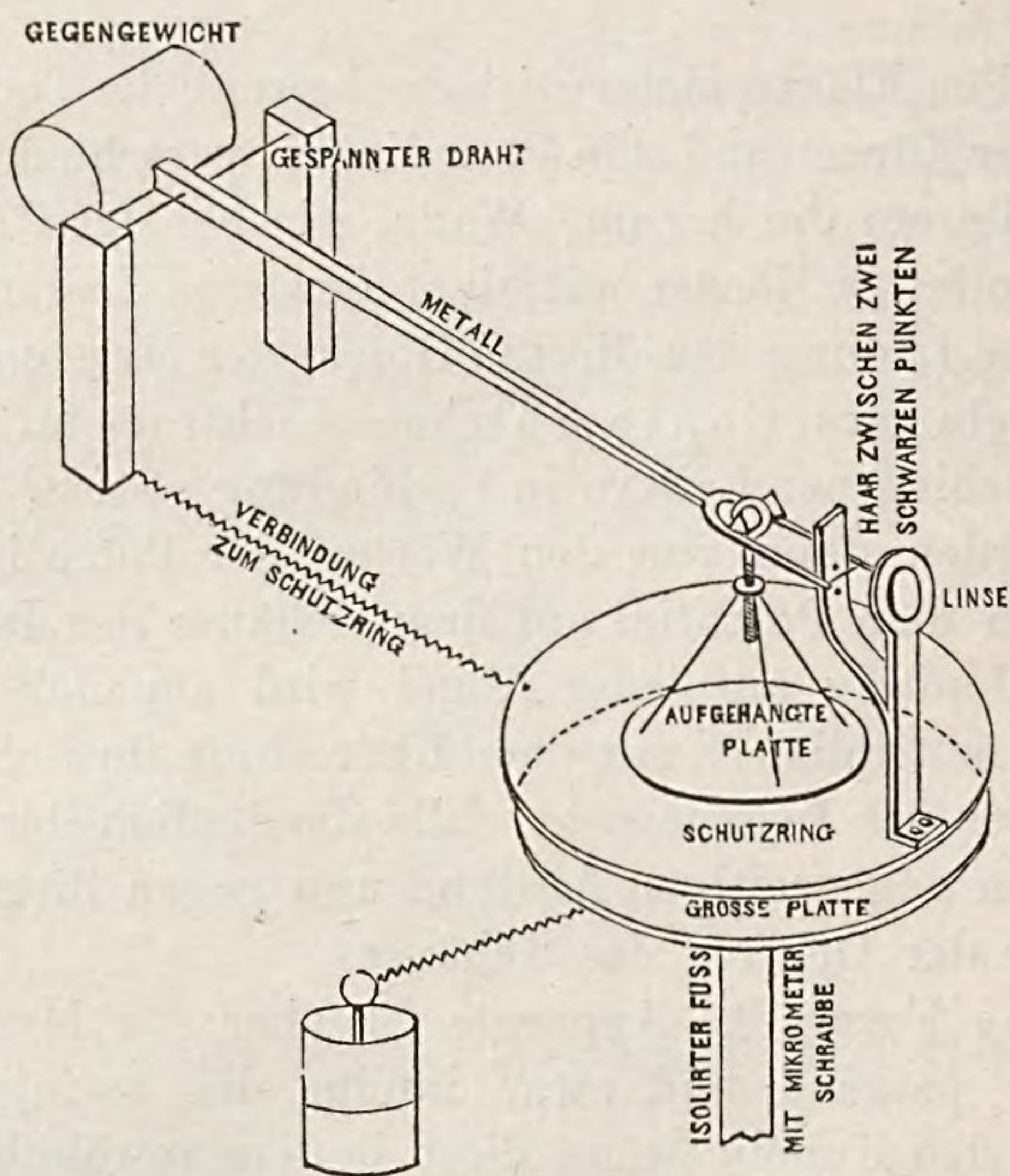
¹⁾ Phil. Trans. 1834.

²⁾ Siehe einen ausgezeichneten Bericht über Elektrometer von Sir W. Thomson. Report of the British Association, Dundee 1867.

Wenn zwei Platten mit verschiedenen Potentialen einander gegenübergestellt werden, so daß ein kleiner Zwischenraum zwischen ihnen bleibt, dann wird auf den einander gegenüberstehenden Seiten eine nahezu gleichmäßige Elektrizitätsverteilung herrschen und auf den Rückseiten der Scheiben wird eine sehr geringe Elektrisierung vorhanden sein, falls nicht andere Leiter oder elektrische Körper in der Umgebung sind. Die Ladung auf der positiven Scheibe wird angenähert proportional ihrem Flächeninhalt und der Differenz der Potentiale auf den Scheiben sein und umgekehrt proportional dem Abstände zwischen ihnen. Machen wir daher die Flächen der Scheiben groß und ihren Abstand klein, so kann schon bei einer kleinen Potentialdifferenz eine meßbare Anziehungskraft resultieren.

204. Die Hinzufügung des Schutzrings zu der angezogenen Scheibe ist eine der wesentlichsten Verbesserungen, welche Sir W. Thomson an dem Apparat angebracht hat.

Fig. 43.



Anstatt eine von den beiden Platten ganz aufzuhängen und die auf sie wirkende Kraft zu bestimmen, trennte er den mittleren Teil der Platte von der übrigen und machte diesen Teil zu der angezogenen Platte, während der äußere Ring, der den Rest der Platte ausmachte, fest gestellt wurde. Auf diese Weise wird die Kraft nur an dem Teile der Platte gemessen, wo sie am regelmässigsten ist, und der Mangel an Gleichmäßigkeit der Elektrizitätsverteilung an

dem Rande ist ohne Bedeutung, da diese Ungleichmäßigkeit auf dem Schutzring und nicht auf dem aufgehängten Teile der Platte eintritt.

Außerdem verband er den Schutzring mit einem metallischen Gehäuse, das die Rückseite der aufgehängten Scheibe und die ganze Aufhängungsvorrichtung umgab, so daß die Elektrisierung der Rückseite der Scheibe unmöglich wurde; denn sie bildet einen Teil der inneren Oberfläche eines geschlossenen hohlen Leiters, der überall dasselbe Potential hat.

Thomson's absolutes Elektrometer besteht daher im wesentlichen aus zwei parallelen Platten mit verschiedenen Potentialen, von denen die eine so eingerichtet ist, daß ein bestimmtes Stück von ihr, von dem kein Teil nahe an dem Rande der Platte ist, unter der Wirkung der elektrischen Kraft beweglich ist. Um unsere Vorstellungen zu fixieren, wollen wir annehmen, daß die angezogene Scheibe und der Schutzring oben sind. Die feststehende Scheibe ist horizontal und ist auf einem isolierten Fusse befestigt, dem durch eine Mikrometerschraube eine meßbare vertikale Bewegung gegeben werden kann. Der Schutzring ist mindestens so groß, wie die feststehende Scheibe; seine untere Fläche ist genau eben und parallel der festen Scheibe. Über dem Schutzring ist eine empfindliche Wage angebracht, an der eine leicht bewegliche Scheibe hängt, die die kreisförmige Öffnung im Schutzringe beinahe ausfüllt, ohne sich am Rande zu reiben. Die untere Fläche der aufgehängten Scheibe muß genau eben sein und wir müssen eine Vorrichtung haben, um zu erkennen, wenn ihre Ebene mit der unteren Fläche des Schutzringes zusammenfällt, so daß sie eine einzige Ebene bilden, die nur durch einen schmalen Zwischenraum zwischen der Scheibe und ihrem Schutzringe unterbrochen ist.

Zu diesem Zwecke schraubt man die untere Scheibe hinauf, bis sie mit dem Schutzringe in Berührung ist und läßt die aufgehängte Scheibe auf der unteren aufliegen, so daß ihre untere Fläche in derselben Ebene ist, wie die des Schutzringes. Ihre Lage gegen den Schutzring wird dann durch ein System von Marken bestimmt. Sir W. Thomson benutzt zu diesem Zwecke ein schwarzes Haar, das an dem beweglichen Teile befestigt ist. Dieses Haar bewegt sich gerade vor zwei schwarzen Punkten auf einem emaillierten, weißen Grunde herauf und herunter und wird mit diesen Punkten zugleich durch eine plankonvexe Linse betrachtet, deren plane Seite dem Auge zugewendet ist. Wenn das Haar, wie man es durch die Linse sieht, gerade erscheint und den Zwischenraum zwischen den schwarzen Punkten halbiert, so sagt man, daß es in seiner „bezeichneten Stellung“ ist, und dies zeigt an, daß die aufgehängte Platte, mit der es sich bewegt, in ihrer richtigen Lage in Bezug auf die Höhe ist. Die Horizontalität der aufgehängten Platte kann man prüfen, indem man ein Objekt

teilweise von ihrer oberen Fläche, teilweise von der oberen Fläche des Schutzringes reflektieren läßt und die Bilder vergleicht.

Die Wage wird dann so eingerichtet, daß, wenn ein bekanntes Gewicht auf die Mitte der aufgehängten Scheibe gelegt wird, diese in der bezeichneten Stellung im Gleichgewicht ist, während der ganze Apparat frei von Elektrizität gemacht ist, indem man alle Teile in metallische Verbindung setzt. Über den Schutzring stellt man eine Metallglocke, die die Wage und die aufgehängte Scheibe einschließt, die aber passende Öffnungen hat, um die Marke sehen zu lassen.

Der Schutzring, das Gehäuse und die aufgehängte Scheibe sind alle in metallischer Verbindung miteinander, aber von den anderen Teilen des Apparates isoliert.

Es werde z. B. die Messung der Potentialdifferenz von zwei Leitern verlangt. Die Leiter werden durch Drähte beziehlich mit der oberen und unteren Scheibe in Verbindung gesetzt, das Gewicht wird von der aufgehängten Scheibe weggenommen und die untere Scheibe wird durch die Mikrometerschraube hinaufbewegt, bis die elektrische Anziehung die aufgehängte Scheibe in ihre „bezeichnete Stellung“ bringt. Wir wissen dann, daß die Anziehung zwischen den Scheiben gleich dem Gewicht ist, welches die Scheibe in ihre „bezeichnete Stellung“ brachte.

Wenn W der Zahlenwert dieses Gewichtes ist und g die Schwerkraft, so ist die Kraft Wg , und wenn A die Fläche der aufgehängten Scheibe, D der Abstand zwischen den Scheiben und V die Potentialdifferenz der Scheiben ist, so ist

$$Wg = \frac{V^2 A}{8 \pi D^2},$$

oder

$$V = D \sqrt{\frac{8 \pi g W}{A}}.$$

Ist die aufgehängte Scheibe ein Kreis vom Radius R und ist R' der Radius der Öffnung des Schutzringes, so ist

$$A = \frac{1}{2} \pi (R^2 + R'^2)^1 \quad \text{und} \quad V = 4 D \sqrt{\frac{g W}{(R^2 + R'^2)}}.$$

1) Bezeichnen wir den Radius der aufgehängten Scheibe mit R und den der Öffnung im Schutzringe mit R' , dann ist die Breite des ringförmigen Zwischenraumes zwischen der Scheibe und dem Ringe $B = R' - R$.

Wenn D der Abstand zwischen der aufgehängten Scheibe und der großen festen Scheibe ist und wenn V die Differenz der Potentiale dieser Scheiben ist, dann wird (s. Electricity and Magnetism, Art. 201) die Elektrizitätsmenge auf der aufgehängten Scheibe sein

$$Q = V \left\{ \frac{R^2 + R'^2}{8 D} - \frac{R'^2 - R^2}{8 D} \frac{\alpha}{D + \alpha} \right\},$$

205. Da immer eine gewisse Unsicherheit in der Bestimmung der Mikrometerangabe für $D = 0$ vorhanden ist und da jeder Fehler in der Bestimmung der Lage der aufgehängten Scheibe von großem Einfluß ist, wenn D klein ist, so zieht es Sir W. Thomson vor, alle seine Messungen abhängig zu machen von Differenzen der elektromotorischen Kraft V . Wenn z. B. V und V' zwei Potentiale sind und D und D' die zugehörigen Entfernungen, so ist

$$V - V' = (D - D') \sqrt{\frac{8\pi g W}{A}}.$$

Um zum Beispiel die elektromotorische Kraft einer galvanischen Batterie zu messen, werden zwei Elektrometer gebraucht.

Durch einen Kondensator, der, wenn es nötig ist, mittels eines „Replenishers“ geladen gehalten wird, wird die untere Scheibe des ersten Elektrometers auf konstantem Potential gehalten. Dies wird bestimmt, indem man die untere Scheibe des ersten Elektrometers mit der unteren Scheibe eines zweiten Elektrometers verbindet, dessen aufgehängte Scheibe mit der Erde verbunden ist. Da der Abstand zwischen den Scheiben des zweiten Elektrometers und die Kraft, die erforderlich ist, um die aufgehängte Scheibe in ihre „bezeichnete Stellung“ zu bringen, konstant sind, so wissen wir, wenn wir das Potential

$$\text{wo } \alpha = B \frac{e \log 2}{\pi}, \text{ oder } \alpha = 0,220635 (R' - R) \text{ ist.}$$

Wenn die Oberfläche des Schutzringes nicht genau in derselben Ebene ist, wie die der aufgehängten Scheibe, so nehmen wir an, daß der Abstand zwischen der festen Scheibe und dem Schutzringe nicht D , sondern $D + z = D'$ ist (s. Electricity and Magnetism, Art. 205). Es wird dann eine Ladung von Elektrizität an dem Rande der Scheibe noch hinzukommen, infolge ihrer größeren Höhe z über der Fläche des Schutzringes. Die ganze Ladung in diesem Falle ist daher

$$Q = V \left\{ \frac{R^2 + R'^2}{8D} - \frac{R'^2 - R^2}{8D} \frac{\alpha}{D + \alpha} + \frac{R + R'}{D} (D - D') \log \frac{4\pi(R + R')}{D' - D} \right\}$$

und in dem Ausdrücke für die Anziehung müssen wir für A , die Fläche der Scheibe, die korrigierte Größe einsetzen:

$$A = \frac{1}{2} \pi \left\{ R^2 + R'^2 - (R'^2 - R^2) \frac{\alpha}{D + \alpha} + 8(R + R')(D' - D) \log \frac{4\pi(R + R')}{D' - D} \right\}.$$

Darin ist

- R = Radius der aufgehängten Scheibe,
- R' = Radius der Öffnung im Schutzringe,
- D = Abstand zwischen fester und aufgehängter Scheibe,
- D' = Abstand zwischen fester Scheibe und Schutzring,
- $\alpha = 0,220635 (R' - R).$

Wenn α gegen D klein ist, so können wir das zweite Glied vernachlässigen, und wenn $D' - D$ klein ist, so können wir das letzte Glied vernachlässigen.

des Kondensators so lange vergrößern, bis das zweite Elektrometer in seiner „bezeichneten Stellung“ ist, daß das Potential der unteren Platte des ersten Elektrometers sich um eine konstante Gröfse, welche wir V nennen wollen, von dem der Erde unterscheidet.

Wenn wir jetzt die positive Elektrode der Batterie mit der Erde verbinden und die aufgehängte Platte des ersten Elektrometers mit der negativen Elektrode, so wird die Differenz der Potentiale zwischen den Scheiben sein $V + v$, wenn v die elektromotorische Kraft der Batterie ist. Es sei D die Angabe des Mikrometers in diesem Falle und D' seine Angabe, wenn die aufgehängte Platte mit der Erde verbunden ist, dann ist

$$v = (D - D') \sqrt{\frac{8 \pi g W}{A}}.$$

Auf diese Weise kann eine kleine elektromotorische Kraft v mit dem Elektrometer gemessen werden, während die Platten des Elektrometers in bequem meßbaren Abständen sind. Wenn der Abstand zu klein ist, so macht eine kleine Änderung in dem Abstände eine große Änderung in der Kraft aus, da die Kraft umgekehrt wie das Quadrat des Abstandes variiert, so daß, wenn nicht der Abstand groß gegen die Fehlergrenzen der Mikrometerschraube ist, jeder Fehler in der absoluten Entfernung einen großen Fehler im Resultate hervorbringt.

Der Einfluß von kleinen Unregelmäßigkeiten in der Form der Plattenoberflächen und in dem Abstände zwischen ihnen verringert sich im umgekehrten Verhältnis der dritten und höheren Potenzen der Entfernung, und welches auch die Gestalt einer rauhen Fläche sein mag, deren Vorsprünge gerade bis zu einer gewissen Ebene reichen, die elektrische Wirkung in einer Entfernung, welche beträchtlich gegen die Breite der Vorsprünge ist, ist dieselbe, wie die einer Ebene in kleinerer Entfernung hinter derjenigen Ebene, bis zu welcher die Vorsprünge reichen.

Durch die Hülfelektrisierung, die durch das Hülfelektrometer bestimmt wird, ist ein passender Abstand zwischen den Scheiben gesichert.

Das Hülfelektrometer kann von einer einfacheren Konstruktion sein, es kann die Vorrichtung zur Bestimmung der anziehenden Kraft im absoluten Mafse fehlen, da das einzige, was gebraucht wird, ist, daß es eine konstante Elektrisierung sichert. Ein solches Elektrometer kann ein Probeelektrometer genannt werden.

Diese Methode, neben der zu messenden Elektrisierung eine Hülfelektrisierung zu benutzen, nennt man die heterostatische Methode der Elektrometrie, im Gegensatz zu der idiostatischen Methode, bei

welcher die ganze Wirkung durch die zu messende Elektrizitätsmenge hervorgebracht wird.

In manchen Formen des Plattenelektrometers ist die angezogene Platte an einem Ende eines Armes befestigt, welcher dadurch gestützt ist, daß er an einem Platindrahte, der durch seinen Schwerpunkt geht, befestigt ist, während der Platindraht durch eine Feder gespannt gehalten wird. Das andere Ende des Armes trägt das Haar, welches durch Änderung des Abstandes zwischen den Platten in eine bezeichnete Stellung gebracht wird, wobei durch die Abstandsänderung die Kraft der elektrischen Anziehung auf einen konstanten Wert gebracht wird. Bei diesen Elektrometern wird diese Kraft im allgemeinen nicht in absolutem Masse gemessen, aber man weiß, daß sie konstant ist, falls die Torsionselastizität des Platindrahtes sich nicht ändert.

Der ganze Apparat befindet sich in einer Leydener Flasche, deren innere Oberfläche geladen und mit der angezogenen Platte und dem Schutzringe in Berührung ist. Die andere Platte wird durch eine Mikrometerschraube geführt und zuerst mit der Erde und dann mit dem Leiter, dessen Potential gemessen werden soll, verbunden. Die Differenz der Ablesungen multipliziert mit einer für jedes Elektrometer zu bestimmenden Konstanten gibt das gesuchte Potential.

Über die Messung des elektrischen Potentials.

206. Um große Potentialdifferenzen in absolutem Masse zu messen, können wir das Plattenelektrometer benutzen und die Anziehung mit der Wirkung eines Gewichts vergleichen. Wenn wir zu gleicher Zeit die Potentialdifferenz derselben Leiter mittels eines Quadrantelektrometers messen, können wir die absoluten Werte für die einzelnen Angaben der Skala des Quadrantelektrometers bestimmen, und auf diese Weise können wir den Wert der Skalenablesungen des Quadrantelektrometers, ausgedrückt durch das Potential des beweglichen Teiles, ableiten und ebenso das Torsionsmoment der Aufhängevorrichtung.

Um das Potential eines geladenen Leiters von endlicher Größe zu bestimmen, können wir den Leiter mit einer Elektrode des Elektrometers verbinden, während die andere mit der Erde oder mit einem Körper von konstantem Potential verbunden ist. Die Elektrometerablesung wird das Potential des Leiters geben, nachdem seine Ladung zwischen ihm und den mit ihm in Verbindung gesetzten Teilen des Elektrometers geteilt ist. Wenn K die Kapazität des Leiters bezeich-

net und K' die Kapazität dieser Teile des Elektrometers, und wenn V, V' die Potentiale dieser Körper vor Herstellung der Verbindung bezeichnen, dann wird ihr gemeinsames Potential nach Herstellung der Verbindung sein

$$\bar{V} = \frac{K V + K' V'}{K + K'}.$$

Daher war das ursprüngliche Potential des Leiters

$$V = \bar{V} + \frac{K'}{K} (\bar{V} - V').$$

Wenn der Leiter nicht groß im Vergleich zu dem Elektrometer ist, so wird K' mit K vergleichbar sein, und wenn wir nicht die Werte von K und K' bestimmen können, so wird das zweite Glied des Ausdrucks einen unbekannten Wert haben. Wenn wir aber das Potential der Elektrometerelektrode, bevor wir die Verbindung herstellen, sehr nahe gleich dem des Körpers machen können, dann wird die Unsicherheit der Werte von K und K' von geringer Bedeutung sein.

Wenn wir den Wert des Potentials des Körpers angenähert kennen, so können wir die Elektrode durch einen Replenisher oder sonst irgendwie bis zu diesem angenäherten Potential laden und das nächste Experiment wird eine noch größere Annäherung geben. Auf diese Weise können wir das Potential eines Leiters messen, dessen Kapazität klein gegen die des Elektrometers ist.

Das Potential an einem Punkte in der Luft zu messen.

207. Erste Methode. Man bringe eine Kugel, deren Radius klein im Vergleich zu ihrem Abstände von den elektrisierten Leitern ist, mit ihrem Mittelpunkt an den gegebenen Punkt. Man verbinde sie durch einen feinen Draht mit der Erde, isoliere sie dann, bringe sie zu einem Elektrometer und bestimme die gesamte Ladung auf der Kugel.

Wenn dann V das Potential an dem gegebenen Punkte und a der Radius der Kugel ist, so wird die Ladung der Kugel $-Va = Q$ sein und wenn V' das an einem Elektrometer gemessene Potential der Kugel ist, wenn sie in einen Raum gebracht wird, dessen Wände mit der Erde in Verbindung sind, dann ist

$$Q = V' a,$$

woraus

$$V + V' = 0$$

folgt, oder: das Potential der Luft an dem Punkte, an dem der Mittelpunkt der Kugel war, ist gleich, aber entgegengesetzt dem Potential der Kugel, wenn sie mit der Erde verbunden, dann isoliert und dann in einen zur Erde abgeleiteten Raum gebracht wird.

Diese Methode wurde von Dellmann aus Kreuznach angewendet bei der Messung des Potentials in bestimmter Höhe über der Erdoberfläche ¹⁾).

Zweite Methode. Wir haben angenommen, daß die Kugel an den gegebenen Punkt gebracht und zuerst mit der Erde verbunden, dann isoliert und dann in einen Raum gebracht werde, der mit leitender Materie vom Potential Null umgeben ist.

Nun nehmen wir an, daß ein feiner isolierter Draht von der Elektrode des Elektrometers bis zu der Stelle hingeführt werde, an der das Potential gemessen werden soll. Zuerst sei die Kugel vollständig entladen. Dies kann man bewirken, wenn man sie in ein Gefäß aus demselben Metall hineinbringt, welches sie nahezu umgibt und sie dieses Gefäß berühren läßt. Nun werde die so entladene Kugel an das Ende des Drahtes und mit ihm in Berührung gebracht. Da die Kugel nicht elektrisiert ist, wird sie das Potential der Luft an dieser Stelle haben. Wenn der Elektrodendraht auf demselben Potential ist, wird er durch die Berührung nicht beeinflusst werden, wenn aber die Elektrode auf anderem Potential ist, so wird dieses durch die Berührung mit der Kugel dem der Luft näher kommen, als es vorher war. Durch eine Reihenfolge solcher Operationen, bei denen die Kugel abwechselnd entladen und mit der Elektrode in Berührung gebracht wird, wird das Potential der Elektrode des Elektrometers sich allmählich dem der Luft an dem gegebenen Punkte nähern.

208. Um das Potential eines Leiters zu messen, ohne ihn zu berühren, können wir das Potential der Luft an einem Punkte in der Umgebung des Leiters messen und aus dem Resultat das des Leiters selbst berechnen.

Wenn eine Höhlung vorhanden ist, die nahezu von dem Leiter eingeschlossen ist, so wird das Potential an einem Punkte der Luft in diesem Hohlraum nahezu gleich dem des Leiters sein.

Auf diese Weise wurde von Sir W. Thomson bestimmt, daß, wenn zwei hohle Leiter, einer aus Kupfer und der andere aus Zink, in metallischem Kontakt sind, daß dann das Potential der Luft in dem vom Zink umgebenen Hohlraum positiv ist gegen das der Luft in dem vom Kupfer umschlossenen Hohlraum.

Dritte Methode. Wenn wir durch irgend ein Mittel bewirken können, daß eine Reihe von kleinen Körpern sich selbst von dem

¹⁾ Vergl. Art. 50.

Ende der Elektrode absondert, so wird das Potential der Elektrode angenähert gleich dem der umgebenden Luft sein. Dies kann man bewirken, indem man Schrot, Feilspähne, Sand oder Wasser aus einem mit der Elektrode verbundenen Trichter oder einer Röhre austreten läßt. Der Punkt, dessen Potential dadurch gemessen wird, ist der, wo der ausfließende Strahl aufhört zusammenhängend zu sein und in seine einzelnen Teile oder Tropfen zerreißt.

Zwölftes Kapitel.

Die Messung des elektrischen Widerstandes.

209. Bei dem gegenwärtigen Zustande der Elektrizitätslehre kann die Bestimmung des elektrischen Widerstandes eines Leiters als die Hauptoperation in der Elektrizität betrachtet werden, in demselben Sinne, wie die Gewichtsbestimmung die Hauptoperation in der Chemie ist.

Die Ursache davon ist die, daß die Bestimmung von anderen elektrischen Größen in absolutem Maße, wie von Elektrizitätsmengen, elektromotorischen Kräften, Stromstärken u. s. w. in jedem Falle eine ganze Reihe von Operationen verlangt, da sie im allgemeinen Zeitbeobachtungen, Längenmessungen, Bestimmungen von Trägheitsmomenten erfordert, und diese Operationen, oder wenigstens einige von ihnen, müssen bei jeder neuen Bestimmung wiederholt werden, da es unmöglich ist, eine Einheit von Elektrizität oder von elektromotorischer Kraft oder von Stromstärke in einem unveränderlichen Zustande zu halten, so daß sie für eine direkte Vergleichung zu benutzen ist.

Wenn aber der elektrische Widerstand eines passend geformten Leiters, der aus passendem Material gewählt ist, einmal bestimmt ist, so findet man, daß er für dieselbe Temperatur immer derselbe bleibt¹⁾, so daß dieser Leiter als ein Normalwiderstand benutzt werden kann, mit dem die Widerstände anderer Leiter verglichen werden können, und die Vergleichung zweier Widerstände ist eine Operation, welche außerordentliche Genauigkeit gestattet.

¹⁾ Neuere Beobachtungen haben gezeigt, daß es gar nicht leicht ist, ein Metall zu finden, das diesen Bedingungen entspricht.

Als die Einheit des elektrischen Widerstandes festgestellt war, wurden materielle Kopieen dieser Einheit in Form von „Widerstandsrollen“ für den Gebrauch der Elektriker verfertigt, so daß in allen Teilen der Welt elektrische Widerstände in derselben Einheit ausgedrückt werden können. Diese Widerstandseinheiten sind augenblicklich die einzigen Beispiele von elektrischen Normalen, welche aufbewahrt, kopiert und zu Messungszwecken gebraucht werden können. Messungen der elektrischen Kapazität, welche auch von großer Wichtigkeit sind, sind noch mangelhaft wegen des störenden Einflusses der elektrischen Absorption.

210. Die Widerstandseinheit kann eine ganz willkürliche sein, wie bei Jakobis Etalon, der ein bestimmter Kupferdraht von 22,4932 g Gewicht, 7,61975 m Länge und 0,667 mm Durchmesser war. Kopieen dieses Etalons wurden von Leiser in Leipzig angefertigt und waren an verschiedenen Orten zu finden.

Nach einer anderen Methode kann die Einheit als der Widerstand eines Teils einer bestimmten Substanz von bestimmten Dimensionen definiert werden. So ist die Siemens-Einheit definiert als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 m Länge, 1 qmm Querschnitt bei der Temperatur 0°C .

211. Endlich kann die Einheit mit Beziehung auf das elektrostatische oder elektromagnetische System von Einheiten definiert werden. In der Praxis wird das elektromagnetische System bei allen telegraphischen Arbeiten gebraucht und deshalb sind die einzigen systematischen Einheiten, die wirklich in Gebrauch sind, die Einheiten dieses Systems.

In dem elektromagnetischen System ist ein Widerstand eine Gröfse von den Dimensionen einer Geschwindigkeit und kann daher als eine Geschwindigkeit dargestellt werden.

212. Die ersten wirklichen Messungen in diesem System wurden von Weber ausgeführt, der als Einheit einen Millimeter in der Sekunde annahm. Sir W. Thomson brauchte später einen Fuß in der Sekunde als Einheit, aber eine große Zahl von Elektrikern hat sich nun geeinigt, die Einheit der British Association anzunehmen, welche erklärt, einen Widerstand darzustellen, der, als Geschwindigkeit ausgedrückt, zehn Millionen Meter in der Sekunde ist. Die Gröfse dieser Einheit ist bequemer als die von Webers Einheit, welche zu klein ist. Man bezeichnet diese Widerstandseinheit mit *B.A.*, aber um sie mit dem Namen des Mannes zu verknüpfen, der die Gesetze des Widerstandes entdeckt hat, nennt man sie das Ohm.

213. Um sich an den Wert des Ohms im absoluten Mafse zu erinnern, ist es nützlich, zu wissen, daß 10 Millionen Meter angenommenermafsen die Entfernung vom Pol zum Äquator ist, auf dem Meridian von Paris gemessen. Ein Körper also, der in einer Sekunde

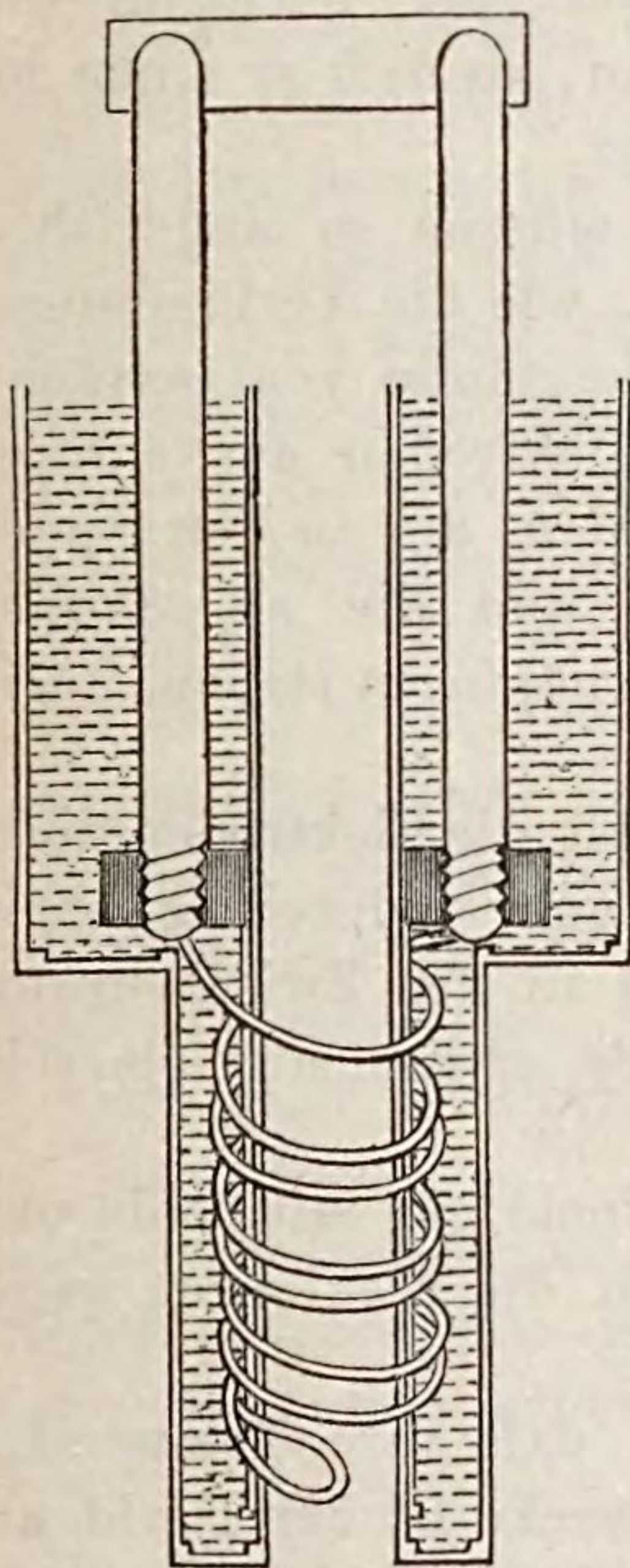
auf einem Meridian vom Pol zum Äquator sich bewegt, würde eine Geschwindigkeit haben, welche in dem elektromagnetischen Masse angenommenen Maßen durch ein Ohm dargestellt wird.

Ich sage angenommenen Maßen, weil, wenn genauere Untersuchungen beweisen würden, daß das Ohm, wie es nach den wirklichen Normalen der British Association konstruiert ist, in Wirklichkeit nicht durch diese Geschwindigkeit dargestellt wird, die Elektriker nicht ihre Normale ändern würden, sondern eine Korrektur anbringen würden. Ebenso ist der Meter angenommenen Maßen der zehnmillionteste Teil eines gewissen Erdquadranten, aber obwohl man fand, daß das nicht genau richtig ist, wurde die Länge des Meters nicht geändert, sondern die Dimensionen der Erde werden durch eine weniger einfache Zahl ausgedrückt.

Nach dem System der British Association ist der absolute Wert der Einheit ursprünglich so gewählt, daß er so nahe wie möglich eine GröÙe darstellt, die aus dem absoluten elektromagnetischen System abgeleitet ist.

214. Wenn eine materielle Einheit, die diese abstrakte GröÙe darstellt, verfertigt ist, dann werden andere Normale durch Kopierung

Fig. 44.



dieser Einheit gemacht, ein Prozeß, der einer außerordentlichen Genauigkeit fähig ist, einer viel größeren Genauigkeit z. B., als die Kopierung eines Meters nach einem Normalmeter.

Diese Kopieen, die aus den beständigensten Materialien gemacht sind, sind über alle Teile der Welt verbreitet, so daß man wahrscheinlich gar keine Schwierigkeiten haben würde, Kopieen von ihnen zu erhalten, wenn die Originalnormale verloren sind.

Solche Einheiten aber, wie die von Siemens, können ohne sehr große Mühe mit erheblicher Genauigkeit wieder verfertigt werden, so daß, wenn das Verhältnis des Ohms zur Siemens-Einheit bekannt ist, das Ohm sogar reproduziert werden kann, ohne daß man ein Normal zum Kopieren hat, obwohl die Arbeit viel größer und die Genauigkeit viel kleiner ist als bei der Methode des Kopierens.

Endlich kann das Ohm auch durch die elektromagnetische Methode, durch welche es ursprünglich bestimmt worden war, reproduziert werden. Diese Methode, welche beträchtlich mehr Arbeit macht als die Bestimmung

eines Fusses aus dem Sekundenpendel, steht an Genauigkeit wahrscheinlich der letzterwähnten Methode nach. Anderseits ist die Bestimmung der elektromagnetischen Einheit ausgedrückt durch das Ohm mit einer Genauigkeit, die dem Fortschritt der Elektrizitätslehre entspricht, eine sehr wichtige physikalische Untersuchung und wohl wert, wiederholt zu werden.

Die wirklichen Widerstandsrollen, die zur Darstellung des Ohms verfertigt werden, werden aus einer Legierung von 2 Teilen Silber und 1 Teil Platin in der Form von Drähten von 5 bis 8 mm Durchmesser und 1 bis 2 m Länge gemacht. Diese Drähte werden an dicke Kupferelektroden angelötet. Der Draht selbst wird mit zwei Lagen von Seide umwickelt, in festes Paraffin eingebettet und in ein Gefäß von dünnem Messing eingeschlossen, so daß es leicht auf die Temperatur gebracht werden kann, in der sein Widerstand gerade ein Ohm ist. Diese Temperatur ist auf dem isolierenden Fusse der Rolle bezeichnet (S. Fig. 44 a. v. S.).

Über die Form der Widerstandsrollen.

215. Eine Widerstandsrolle ist ein Leiter, der leicht in den Volta'schen Stromkreis gebracht werden kann, so daß er einen bekannten Widerstand in den Stromkreis einführt.

Die Elektroden oder die Enden der Rolle müssen so eingerichtet sein, daß kein merklicher Fehler aus der Art, wie die Verbindungen hergestellt werden, entstehen kann. Für Widerstände von beträchtlicher Größe ist es hinreichend, wenn die Elektroden aus starken Kupferdrähten oder Kupferstäben gemacht werden, die an den Enden sorgfältig mit Quecksilber amalgamiert sind und die an schwach amalgamierte Kupferflächen, die in Quecksilbernäpfchen stehen, ange-drückt werden.

Für sehr große Widerstände genügt es, daß die Elektroden dicke Messingstücke sind und daß die Verbindungen dadurch gemacht werden, daß man Messing- oder Kupferstöpsel in den Zwischenraum zwischen ihnen hineinklemmt. Diese Methode erwies sich als sehr bequem.

Die Widerstandsrolle selbst besteht aus einem gut mit Seide umsponnenen Draht, dessen Enden permanent an die Elektroden angelötet sind.

Die Rolle muß so eingerichtet werden, daß ihre Temperatur leicht beobachtet werden kann. Zu diesem Zwecke ist der Draht auf eine Röhre aufgewunden und mit einer anderen Röhre bedeckt, so daß das Ganze in ein Wassergefäß gestellt werden kann und das Wasser Zutritt zu der inneren und äußeren Seite der Rolle hat.

Um elektromagnetische Wirkungen des Stromes in der Rolle zu vermeiden, wird der Draht doppelt gelegt und dann erst auf die Röhre gewunden, so daß in jedem Teile der Rolle gleiche und entgegengesetzte Ströme in den nebeneinander liegenden Teilen des Drahtes vorhanden sind.

Wenn man zwei Rollen auf derselben Temperatur zu halten wünscht, bringt man manchmal die Drähte nebeneinander und rollt sie zusammen auf. Diese Methode ist besonders von Nutzen, wenn es wichtiger ist, die Gleichheit des Widerstandes zu sichern als den absoluten Wert des Widerstandes zu kennen, wie zum Beispiel in dem Falle der gleichen Zweige in der Wheatstoneschen Brücke (Art. 221).

Als zuerst Widerstandsmessungen in Angriff genommen wurden, benutzte man oft eine Widerstandsrolle, die aus einem unbesponnenen Drahte bestand, der spiralförmig um einen isolierenden Cylinder herum gewunden war. Man nannte dies einen Rheostaten. Für die Genauigkeit, mit der es möglich ist, Widerstände zu vergleichen, paßte aber, wie man bald einsah, der Gebrauch eines solchen Instrumentes nicht, bei welchem die Kontakte nur sehr unvollkommen hergestellt werden können. Der Rheostat wird jedoch noch immer zur Abgleichung von Widerständen benutzt, wenn keine genaue Messung verlangt wird.

Widerstandsrollen werden im Allgemeinen aus denjenigen Metallen gemacht, deren Widerstand am größten ist und sich am wenigsten mit der Temperatur ändert. Neusilber erfüllt diese Bedingungen sehr gut, aber einige Proben veränderten, wie man fand, ihre Eigenschaften während des Verlaufs einiger Jahre. Deshalb benutzte man für Normalrollen einige reine Metalle und auch eine Legierung von Platin und Silber, und ihr Widerstand bleibt in der That während mehrerer Jahre konstant, wenigstens innerhalb der Grenzen der Genauigkeit unserer Messungen ¹⁾.

216. Für sehr große Widerstände, z. B. mehrere Millionen Ohms, muß der Draht sehr lang oder sehr dünn sein und die Verfertigung einer Rolle ist kostspielig und schwierig. Deswegen wurden Tellur und Selen als Stoffe zur Verfertigung von Normalen für große Widerstände vorgeschlagen.

Eine sehr sinnreiche und einfache Anfertigung wurde vor einiger Zeit von Phillips ²⁾ vorgeschlagen. Man zieht auf ein Stück Ebonit oder Spiegelglas eine feine Bleistiftlinie. Die Enden des Bleistriches werden mit metallischen Elektroden verbunden und das Ganze dann mit isolierendem Firnis umgeben. Wenn man finden

¹⁾ Neuere Versuche zeigen eine kleine Änderung im Widerstande im Verlauf der Zeit.

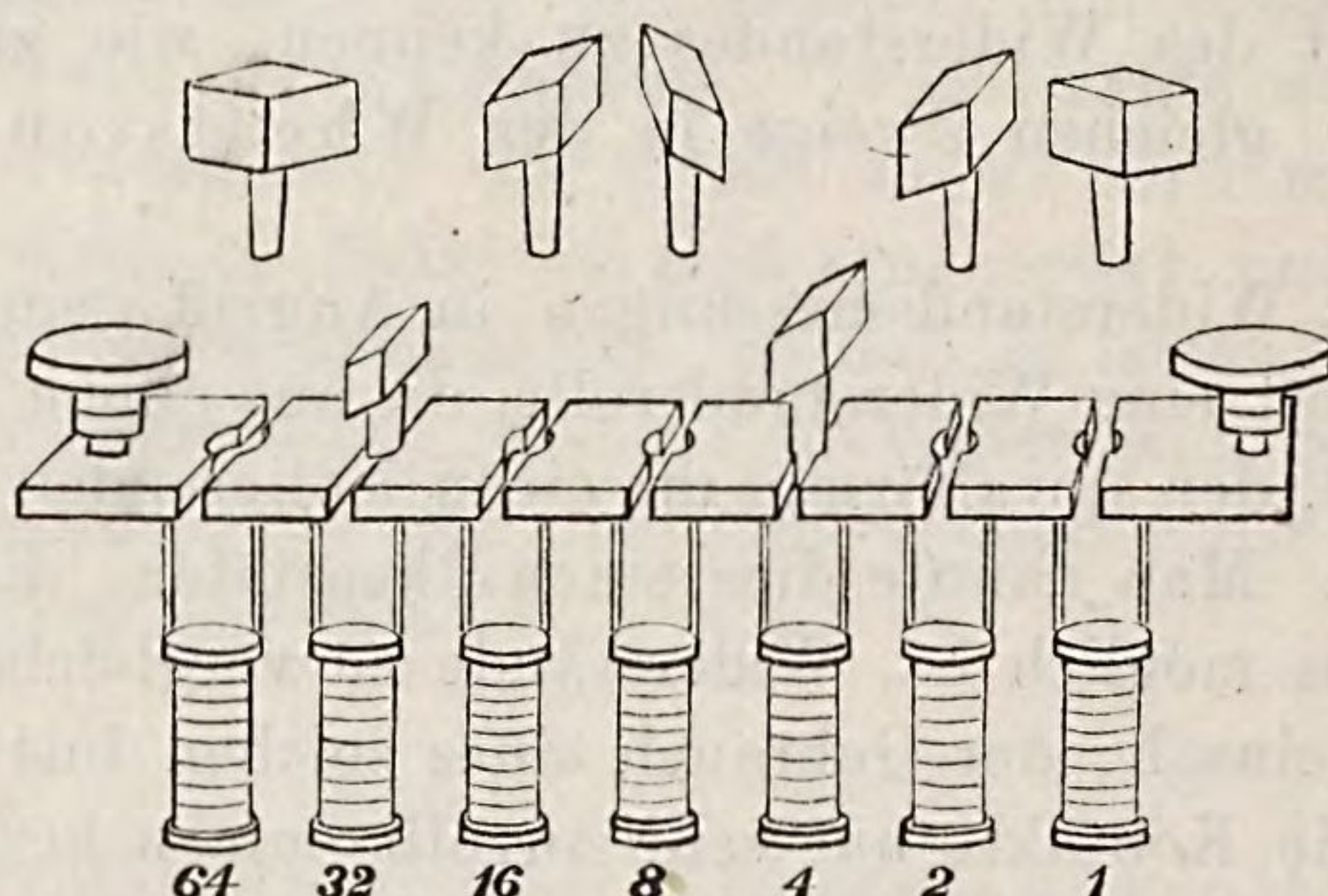
²⁾ Phil. Mag., Juli 1870.

sollte, daß der Widerstand einer solchen Bleistiftlinie konstant bleibt, so wird das die beste Methode sein, um einen Widerstand von vielen Millionen Ohms zu erhalten.

217. Wir haben verschiedene Einrichtungen, mittels welchen wir Widerstandsrollen leicht in einen Stromkreis einschalten können.

Es kann zum Beispiel eine Reihe von Rollen, deren Widerstände 1, 2, 4, 8, 16 u. s. w. sind, geordnet nach den Potenzen von 2, in einen Kasten gestellt werden.

Fig. 45.



Die Elektroden bestehen dabei aus dicken Messingplatten, die auf der Außenseite des Kastens so angebracht sind, daß, wenn man einen Messingstöpsel oder Keil zwischen zwei von ihnen als Nebenschluß einquetscht, der Widerstand der entsprechenden Rolle aus dem Stromkreise ausgeschaltet wird. Diese Einrichtung wurde von Siemens eingeführt.

An den Zwischenräumen zwischen den einzelnen Elektroden ist der Widerstand der entsprechenden Rolle angegeben, so daß, wenn wir den Widerstand 107 aus dem Kasten nehmen wollen, wir 107 in dem binären System ausdrücken als $64 + 32 + 8 + 2 + 1$ oder 1101011. Wir nehmen also die Stöpsel aus den Löchern, die 64, 32, 8, 2, 1 entsprechen, heraus und lassen die Stöpsel bei 16 und 4 darin.

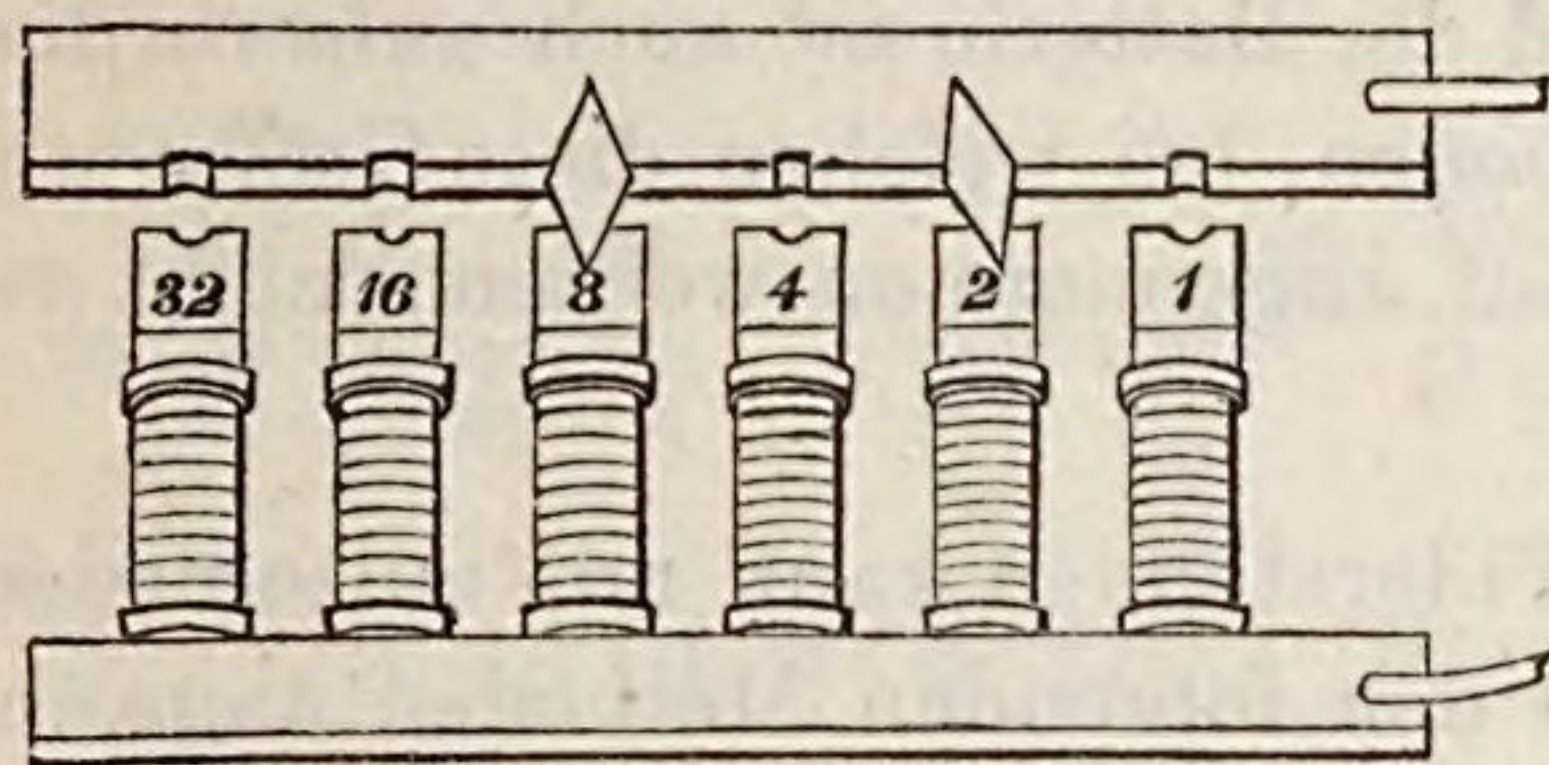
Diese Methode, die auf das binäre System gegründet ist, ist diejenige, bei welcher die kleinste Zahl von einzelnen Rollen gebraucht wird und sie ist auch diejenige, welche am leichtesten geprüft werden kann, denn wenn wir noch eine Rolle gleich 1 haben, so können wir die Gleichheit von 1 und $1'$ prüfen, dann die von $1 + 1'$ und 2, dann die von $1 + 1' + 2$ und 4 u. s. w.

Der einzige Mangel dieser Einrichtung ist der, daß sie eine Vertrautheit mit der binären Reihenfolge verlangt, welche im Allgemeinen nicht bei allen vorhanden ist, da wir gewohnt sind, jede Zahl im Dezimalsystem auszudrücken.

218. In anderer Weise kann ein Widerstandskasten dazu benutzt werden, um Leitungsfähigkeiten anstatt Widerstände zu messen.

Die Rollen werden so gestellt, daß das eine Ende von jeder mit einem langen dicken Metallstück verbunden ist, welches eine Elektrode des Kastens bildet. Die anderen Enden sind mit starken Messingplättchen wie in dem früheren Falle verbunden.

Fig. 46.



Die Leitungsfähigkeit des Kastens ist dann die Summe der Leitungsfähigkeiten der Rollen.

In der Figur, in welcher die Widerstände der Rollen 1, 2, 4 u. s. w. sind, und die Stöpsel bei 2 und 8 eingeschoben sind, ist die Leitungsfähigkeit des Kastens $\frac{1}{2} + \frac{1}{8} = \frac{5}{8}$ und der Widerstand des Kastens ist daher $\frac{8}{5}$ oder 1,6.

Diese Methode, Widerstandsrollen zu verbinden, um Bruchteile von Widerständen zu messen, wurde von Sir W. Thomson ausgeführt unter dem Namen der Methode der vielfachen Zweige (S. Art. 158).

Über die Vergleichung von Widerständen.

219. Wenn E die elektromotorische Kraft einer Batterie ist und R der Widerstand der Batterie und ihrer Verbindungen, einschließlich des zur Messung des Stromes dienenden Galvanometers, und wenn I die Stärke des Stromes ist, falls die Batterieverbindungen geschlossen sind, und I_1 und I_2 die Stromstärken sind, wenn neue Widerstände r_1 und r_2 noch in den Stromkreis eingeschaltet werden, dann ist nach dem Ohmschen Gesetz

$$E = IR = I_1 (R + r_1) = I_2 (R + r_2).$$

Eliminieren wir E , die elektromotorische Kraft der Batterie, und R , den Widerstand der Batterie und ihrer Verbindungen, so erhalten wir Ohms Formel

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{(I - I_1) I_2}{(I - I_2) I_1}.$$

Diese Methode erfordert eine Messung der Verhältnisse von I , I_1 , I_2 und dies verlangt ein Galvanometer, das für absolute Messungen graduirt ist.

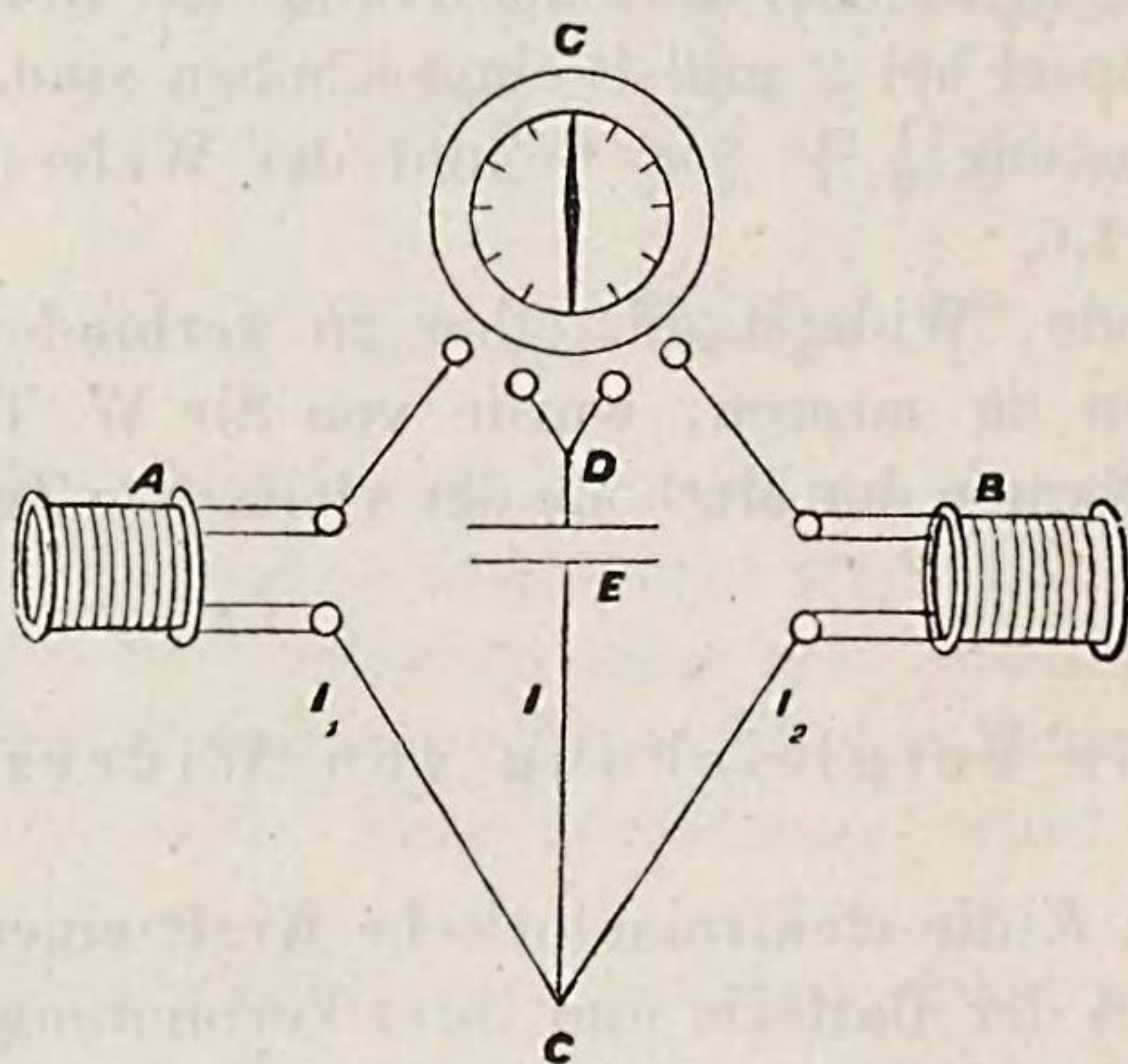
Wenn die Widerstände r_1 und r_2 gleich sind, dann sind I_1 und I_2 gleich und wir können die Gleichheit der Stromstärken durch ein Gal-

vanometer prüfen, welches zur Bestimmung ihrer Verhältnisse nicht geeignet wäre.

Aber das ist eher als ein Beispiel einer mangelhaften Methode anzusehen, denn als eine praktische Methode, Widerstände zu bestimmen. Die elektromotorische Kraft E kann nicht streng konstant erhalten werden, und der innere Widerstand der Batterie ist auch außerordentlich veränderlich, so daß alle Methoden, bei welchen diese GröÙe auch nur für eine kurze Zeit als konstant angenommen werden, nicht verläßlich sind.

220. Die Vergleichung von Widerständen kann mit außerordentlicher Genauigkeit durch jede von den folgenden Methoden angestellt werden, bei welchen das Resultat unabhängig von den Variationen von R und E ist.

Fig. 47.



Die erste dieser Methoden hängt von der Anwendung des Differentialgalvanometers ab, eines Instrumentes, welches zwei Rollen enthält, in denen die Ströme von einander unabhängig sind, so daß, wenn man die Ströme in entgegengesetzten Richtungen fließen läßt, sie die Nadel nach entgegengesetzten Richtungen beeinflussen, und daß, wenn das Verhältnis dieser Ströme das von m zu n ist, sie keine resultierende Wirkung auf die Galvanometernadel ausüben.

Es seien I_1 , I_2 die Ströme durch die beiden Rollen des Galvanometers, dann kann die Ablenkung geschrieben werden

$$\delta = m I_1 - n I_2.$$

Nun werde der Batteriestrom I zwischen den Galvanometerrollen geteilt und die Widerstände A und B mögen respektive in die erste und zweite Rolle eingeschaltet werden. Der übrige Widerstand ihrer Rollen und ihrer Verbindungsdrähte sei α respektive β , der Widerstand der Batterie und ihrer Verbindungsdrähte zwischen C und D sei r und ihre elektromotorische Kraft sei E .

Dann finden wir nach dem Ohmschen Gesetz für die Potentialdifferenz zwischen C und D

$$C - D = I_1 (A + \alpha) = I_2 (B + \beta) = E = Ir,$$

und da

$$I_1 + I_2 = I$$

ist, so ist

$$I_1 = E \frac{B + \beta}{D}, \quad I_2 = E \frac{A + \alpha}{D}, \quad I = E \frac{A + \alpha + B + \beta}{D},$$

wo

$$D = (A + \alpha) (B + \beta) + r (A + \alpha + B + \beta)$$

ist. Die Ablenkung der Galvanometernadel ist daher

$$\delta = \frac{E}{D} \left\{ m (B + \beta) - n (A + \alpha) \right\},$$

und wenn keine merkliche Ablenkung sich zeigt, dann wissen wir, daß die in Klammern eingeschlossene GröÙe sich von Null nur um eine gewisse kleine GröÙe unterscheiden kann, eine kleine GröÙe, die abhängt von der Stärke der Batterie, der Zweckmässigkeit der Einrichtung, der Feinheit des Galvanometers und der Genauigkeit des Beobachters.

Nehmen wir an, daß B so abgeglichen ist, daß keine deutliche Ablenkung vorhanden ist.

Nun werde für A ein anderer Leiter A' substituiert und es werde nun A' so lange geändert, bis keine deutliche Ablenkung erscheint. Dann ist offenbar in erster Annäherung $A' = A$.

Um den Grad der Genauigkeit dieser Schätzung zu bestimmen, mögen die bei der zweiten Beobachtung geänderten GröÙen accentuiert werden, dann ist

$$m (B + \beta) - n (A + \alpha) = \frac{D}{E} \delta,$$

$$m (B + \beta) - n (A' + \alpha) = \frac{D'}{E'} \delta',$$

folglich

$$n (A' - A) = \frac{D}{E} \delta - \frac{D'}{E'} \delta'.$$

Wenn man, anstatt δ und δ' wirklich zu Null zu machen, nur beide gleich gemacht hätte, dann könnte, wenn man nicht auch sicher ist, daß $E = E'$ ist, die rechte Seite der Gleichung nicht Null sein. In Wirklichkeit wäre dann diese Methode nur eine Modifikation der vorhin beschriebenen.

Der Vorteil der Methode besteht darin, daß das, was beobachtet wird, das Nichtauftreten eines Ausschlags ist, oder mit anderen Worten, die Methode ist eine Nullmethode, eine Methode, bei welcher das Nicht-

vorhandensein einer Kraft bestimmt wird aus einer Beobachtung, bei welcher die Kraft, wenn sie um mehr als eine gewisse geringe Gröfse von Null verschieden wäre, eine beobachtbare Wirkung hervorgebracht hätte.

Nullmethoden sind von großem Wert, wo sie angewendet werden können, aber sie können nur angewendet werden, wenn wir gleiche und entgegengesetzte Gröfsen derselben Art in das Experiment zusammen eingehen lassen können.

In dem vorliegenden Falle sind δ sowohl wie δ' zu kleine Gröfsen, um beobachtet zu werden und daher wird eine Änderung in den Werten E die Genauigkeit des Resultats nicht beeinflussen.

Der wirkliche Genauigkeitsgrad dieser Methode könnte bestimmt werden, indem man eine Anzahl von Beobachtungen nimmt, bei denen man jedesmal A' besonders abgeglichen hat, und indem man dann das Resultat jeder Beobachtung mit dem Mittel der ganzen Reihe vergleicht.

Zerstört man aber die Abgleichung von A' um eine bekannte Gröfse, indem man zum Beispiel in A oder B einen Überwiderstand gleich einem Hundertstel des Widerstandes von A oder B hinzufügt, und beobachtet man dann den resultierenden Ausschlag der Galvanometernadel, so kann man die Anzahl Grade bestimmen, die einem Fehler von 1 Prozent entsprechen. Um dann den wirklichen Genauigkeitsgrad zu finden, müssen wir die kleinste Ablenkung bestimmen, welche der Beobachtung nicht entgehen könnte, und diese mit der Ablenkung vergleichen, die einem Fehler von 1 Proz. entspricht.

Wenn die Vergleichung zwischen A und B angestellt und dann die Lage von A und B vertauscht wird, dann wird die zweite Gleichung

$$m (A + \beta) - n (B + \alpha) = \frac{D'}{E'} \delta',$$

folglich

$$(m + n) (B - A) = \frac{D}{E} \delta - \frac{D'}{E'} \delta'.$$

Wenn m und n , A und B , α und β angenähert gleich sind, dann ist

$$B - A = \frac{1}{2nE} (A + \alpha) (A + \alpha + 2r) (\delta - \delta').$$

Hier kann $\delta - \delta'$ als die kleinste zu beobachtende Ablenkung des Galvanometers genommen werden.

Wenn der Galvanometerdraht länger und dünner gemacht wird, während er dabei dieselbe Gesamtmasse behält, dann wird n variieren wie die Länge des Drahtes und α wie das Quadrat der Länge. Es wird daher ein Minimum von $\frac{(A + \alpha) (A + \alpha + 2r)}{n}$ eintreten, wenn

$$\alpha = \frac{1}{3} (A + r) \left\{ 2 \sqrt{1 - \frac{3}{4} \frac{r^2}{(A + r)^2}} - 1 \right\}.$$

Nehmen wir r , den Batteriewiderstand, klein gegen A an, so gibt das

$$\alpha = \frac{1}{3} A,$$

oder: der Widerstand jeder Galvanometerrolle sollte ein Drittel des zu messenden Widerstandes sein.

Wir finden dann

$$B - A = \frac{8}{9} \frac{A^2}{n E} (\delta - \delta').$$

Lassen wir den Strom nur durch eine Galvanometerrolle fließen und ist die dadurch hervorgebrachte Ablenkung Δ (wobei wir annehmen, daß die Ablenkung genau proportional der ablenkenden Kraft ist), dann ist

$$\Delta = \frac{m E}{A + \alpha + r} = \frac{3}{4} \frac{n E}{A},$$

wenn $r = 0$ und $\alpha = \frac{1}{3} A$ ist. Folglich

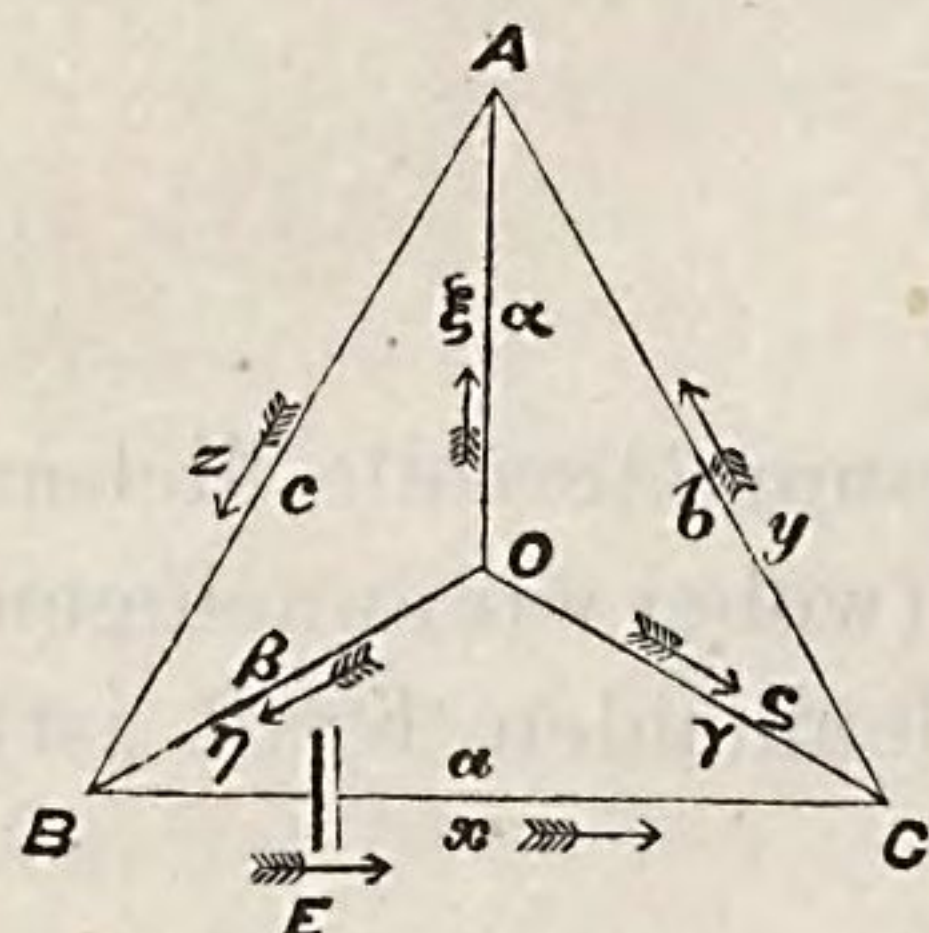
$$\frac{B - A}{A} = \frac{2}{3} \frac{\delta - \delta'}{\Delta}.$$

In dem Differentialgalvanometer läßt man zwei Ströme gleiche und entgegengesetzte Wirkungen auf die aufgehängte Nadel hervorbringen. Die Kraft, mit welcher jeder von beiden Strömen auf die Nadel wirkt, hängt nicht nur von der Stärke des Stromes, sondern auch von der Lage der Windungen des Drahtes gegen die Nadel ab. Daher kann, wenn die Rolle nicht sehr sorgfältig gewunden ist, das Verhältnis m zu n sich ändern, wenn die Lage der Nadel sich ändert, und daher ist es notwendig, dieses Verhältnis während jeder Beobachtungsreihe besonders zu bestimmen, wenn eine Änderung in der Lage der Nadel vermutet wird.

Die andere Nullmethode, bei welcher die Wheatstonesche Brücke angewendet wird, verlangt nur ein gewöhnliches Galvanometer, und die beobachtete Nullstellung der Nadel rührt nicht von der entgegengesetzten Wirkung zweier Ströme, sondern von dem Nichtvorhandensein eines Stromes in dem Drahte her. Wir haben also nicht nur einen Nullausschlag, sondern einen Nullstrom als beobachtete Erscheinung und es können keine Fehler aus dem Mangel an Regelmäßigkeit oder aus einer Änderung irgend welcher Art in den Rollen des Galvanometers entstehen. Das Galvanometer braucht nur empfindlich genug zu sein, um die Existenz und Richtung eines Stromes anzuzeigen, ohne daß es irgendwie seine Stärke zu bestimmen oder sie mit der Stärke eines anderen Stromes zu vergleichen braucht.

221. Die Wheatstonesche Brücke besteht im wesentlichen aus sechs Leitern, die vier Punkte verbinden. Eine elektromotorische Kraft E läßt man zwischen zweien dieser Punkte wirken, indem man eine Voltasche Batterie zwischen B und C einführt. Der Strom zwischen den beiden anderen Punkten wird durch ein Galvanometer gemessen.

Fig. 48.



Unter gewissen Umständen wird dieser Strom Null. Man sagt dann, die Leiter BC und OA sind einander konjugiert, was eine gewisse Beziehung zwischen den Widerständen der anderen vier Leiter involviert, und diese Beziehung wird zur Messung der Widerstände benutzt.

Wenn der Strom in OA Null ist, muß das Potential in O gleich dem in A sein. Nun können wir, wenn wir die Potentiale in B und C kennen, die in O und A nach der in Art. 157 angegebenen Regel bestimmen, für den Fall, daß in OA kein Strom ist

$$O = \frac{B\gamma + C\beta}{\beta - \gamma}, \quad A = \frac{Bb + Cc}{b + c},$$

woraus die Bedingung folgt

$$b\beta = c\gamma,$$

wo b, c, β, γ die Widerstände bezüglich in CA, AB, BO und OC sind.

Um den durch diese Methode erreichbaren Genauigkeitsgrad zu bestimmen, müssen wir die Stärke des Stromes bestimmen, wenn diese Bedingung nicht genau erfüllt ist.

Es seien A, B, C und O die vier Punkte. Die Stromstärken in BC, CA und AB seien x, y und z und die Widerstände dieser Leiter a, b und c . Die Stromstärken in OA, OB seien ξ, η, ζ und die Widerstände α, β und γ . Eine elektromotorische Kraft E wirke in der Richtung BC . Gesucht wird der Strom ξ in OA .

Es werden die Potentiale in den Punkten A, B, C und O mit den Symbolen A, B, C und O bezeichnet. Die Gleichungen des Ohmschen Gesetzes sind dann

$$\begin{aligned} ax &= B - C + E, & \alpha\xi &= O - A, \\ by &= C - A, & \beta\eta &= O - B, \\ cz &= A - B, & \gamma\zeta &= O - C, \end{aligned}$$

und die Gleichungen der Kontinuität

$$\begin{aligned} \xi + y - z &= 0, \\ \eta + z - x &= 0, \\ \xi + x - y &= 0. \end{aligned}$$

Betrachten wir das System als aus den drei Stromkreisen OBC , OCA und OAB bestehend, in welchen die Ströme bezüglich sind x , y und z und wenden wir auf jeden die Kirchhoff'sche Regel (Art. 158) an, so können wir die Werte der Potentiale O , A , B , C und die Stromstärken ξ , η , ζ eliminieren, und wir erhalten so folgende Gleichungen für x , y und z

$$\begin{aligned}(a + \beta + \gamma) x - \gamma y & - \beta z & = E, \\ - \gamma x + (b + \gamma + \alpha) y - \alpha z & = 0, \\ - \beta x - \alpha y + (c + \alpha + \beta) z & = 0.\end{aligned}$$

Setzen wir daher

$$D = \begin{vmatrix} a + \beta + \gamma & -\gamma & -\beta \\ -\gamma & b + \gamma + \alpha & -\alpha \\ -\beta & -\alpha & c + \alpha + \beta \end{vmatrix},$$

so finden wir

$$\xi = \frac{E}{D} (b\beta - c\gamma).$$

und

$$x = \frac{E}{D} \{(b + \gamma)(c + \beta) + \alpha(b + c + \beta + \gamma)\}.$$

222. Der Wert von D läßt sich in der symmetrischen Form darstellen

$$\begin{aligned}D &= abc + bc(\beta + \gamma) + ca(\gamma + \alpha) + ab(\alpha + \beta) \\ &+ (a + b + c)(\beta\gamma + \gamma\alpha + \alpha\beta)\end{aligned}$$

oder, da wir annehmen, daß die Batterie in dem Leiter a und das Galvanometer in α ist, so können wir B , den Batteriewiderstand für a und G , den Galvanometerwiderstand für α setzen. Wir finden dann

$$\begin{aligned}D &= BG(b + c + \beta + \gamma) + B(b + \gamma)(c + \beta) \\ &+ G(b + c)(\beta + \gamma) + bc(\beta + \gamma) + \beta\gamma(b + c).\end{aligned}$$

Läßt man die elektromotorische Kraft E in der Richtung nach OA wirken, während der Widerstand von OA noch α ist, und bringt man das Galvanometer in BC , wobei der Widerstand von BC noch a ist, dann wird der Wert von D derselbe bleiben und der Strom in BC , der von der elektromotorischen Kraft E längs OA herrührt, wird gleich sein dem Strome in OA , der von der elektromotorischen Kraft E in BC herrührt.

Wenn wir aber einfach die Batterie und das Galvanometer aus dem Stromkreise herausnehmen und dann, ohne ihre respektiven Widerstände zu ändern, die Batterie mit O und A und das Galvanometer mit B und C verbinden, dann müssen wir in dem Ausdruck

von D die Werte von B und G vertauschen. Ist D' der Wert von D nach dieser Vertauschung, so finden wir

$$\begin{aligned} D' - D &= (G - B) \{(b + c) (\beta + \gamma) - (b + \gamma) (\beta + c)\}, \\ &= (B - G) \{(b - \beta) (c - \gamma)\}. \end{aligned}$$

Wir wollen annehmen, daß der Widerstand des Galvanometers größer ist als der der Batterie.

Wir wollen ferner annehmen, daß in der ursprünglichen Anordnung das Galvanometer die Verbindungsstelle der beiden Leiter vom kleinsten Widerstande β, γ mit der Verbindungsstelle der beiden Leiter vom größten Widerstande b, c verbindet, oder in anderen Worten, wir wollen annehmen, daß, wenn die Größen b, c, γ, β nach der Größe geordnet werden, b und c zusammengehören und γ und β zusammengehören. Die Größen $b - \beta$ und $c - \gamma$ haben daher daselbe Zeichen, so daß ihr Produkt positiv ist, und daher hat $D' - D$ daselbe Zeichen wie $B - G$.

Wenn man daher die Verbindungsstelle der beiden größten Widerstände durch das Galvanometer mit der der beiden kleinsten verbindet und wenn der Galvanometerwiderstand größer ist als der Batteriewiderstand, dann wird der Wert von D kleiner, also der Wert des Galvanometerausschlags größer sein, als wenn die Verbindungen vertauscht werden.

Die Regel, welche angibt, wie man in einem gegebenen System den größten Galvanometerausschlag erhält, ist daher folgende:

Von den beiden Widerständen, dem der Batterie und dem des Galvanometers, bringe man den größeren so an, daß er die beiden größten und die beiden kleinsten der vier Widerstände mit einander verbindet.

223. Wir wollen annehmen, daß wir das Verhältnis der Widerstände der Leiter AB und AC zu bestimmen haben, und daß dies dadurch auszuführen ist, daß wir auf dem Leiter BOC einen Punkt O suchen, der so beschaffen ist, daß, wenn die Punkte A und O durch einen Draht verbunden werden, in den ein Galvanometer eingeschaltet ist, daß dann keine merkliche Ablenkung der Galvanometernadel eintritt, wenn man die Batterie zwischen B und C wirken läßt.

Der Induktor BOC mag ein Draht von gleichförmigem Widerstand sein, der in eine Anzahl gleicher Teile so eingeteilt ist, daß das Verhältnis der Widerstände BO und OC auf einmal abgelesen werden kann.

Statt daß der ganze Leiter ein gleichförmiger Draht ist, können wir auch den Teil in der Nähe von O aus einem solchen Drahte machen und sonst können auf beiden Seiten Rollen von irgend welcher Form sein, deren Widerstand genau bekannt ist.

Wir wollen nun eine andere Bezeichnung an Stelle der symmetrischen Beziehungsweise, welche wir anfangs benutzt hatten.

Der ganze Widerstand von BAC sei R .

Es sei $c = mR$ und $b = (1 - m)R$.

Der ganze Widerstand von BOC sei S .

Es sei $\beta = nS$ und $\gamma = (1 - n)S$.

Der Wert von n wird direkt abgelesen und der von m wird aus ihm abgeleitet, wenn kein merklicher Ausschlag des Galvanometers vorhanden ist.

Der Widerstand der Batterie und ihrer Verbindungsdrähte sei B , der des Galvanometers und seiner Verbindungsdrähte G .

Wir finden, wie früher

$$D = G \{BR + BS + RS\} + m(1 - m)R^2(B + S) \\ + n(1 - n)S^2(B + R) + (m + n - 2mn)BRS,$$

und wenn ξ die Intensität des Stromes im Galvanometerdraht ist

$$\xi = \frac{ERS}{D} (n - m).$$

Um die genauesten Resultate zu erhalten, müssen wir den Ausschlag der Nadel möglichst groß im Vergleich zu dem Wert von $n - m$ machen. Dies läßt sich erreichen, indem man die Dimensionen des Galvanometers und den Widerstand des Maßdrahtes möglichst groß macht.

Man kann beweisen, daß, wenn die Form eines Galvanometerdrahtes geändert wird, während seine Masse konstant bleibt, daß dann der Ausschlag der Nadel für die Einheit des Stromes proportional ist der Länge des Drahtes, daß aber der Widerstand wie das Quadrat der Länge wächst. Daraus ergibt sich, daß der maximale Ausschlag eintritt, wenn der Widerstand des Galvanometerdrahtes gleich dem konstanten Widerstande des übrigen Stromkreises ist.

In dem gegenwärtigen Falle ist, wenn δ den Ausschlag bezeichnet

$$\delta = C \sqrt{G\xi},$$

wo C eine Konstante und G der Galvanometerwiderstand ist, der wie das Quadrat der Länge des Drahtes variiert. Wir finden daher, daß, wenn δ ein Maximum ist, in dem Ausdrucke von D der Teil, der G enthält, gleich dem übrigen Ausdruck gemacht werden muß.

Wenn wir noch $m = n$ setzen, wie es der Fall ist, wenn wir eine richtige Beobachtung gemacht haben, so finden wir, daß der beste Wert von G ist

$$G = n(1 - n)(R + S).$$

Dieses Resultat erhält man leicht, wenn man den Widerstand von A nach O durch das System hindurch betrachtet und sich erinnert,

dafs BC , da es zu OA konjugiert ist, keinen Einfluss auf diesen Widerstand hat.

Auf dieselbe Weise würden wir finden, dafs, wenn der gesamte Flächeninhalt der wirkenden Batterieoberflächen gegeben ist, die vorteilhafteste Anordnung der Batterie die ist, bei welcher

$$B = \frac{RS}{R + S}$$

ist.

Endlich wollen wir den Wert von S so bestimmen, dafs eine gegebene Änderung in dem Werte von n den grössten Galvanometerausschlag hervorbringt. Durch Differentiation des Ausdruckes für ξ finden wir

$$S^2 = \frac{BR}{B + R} \left(R + \frac{G}{n(1 - n)} \right).$$

Wenn wir eine grosse Menge Widerstandsbestimmungen zu machen haben, wobei der wirkliche Widerstand nahezu denselben Wert hat, dann kann es der Mühe wert sein, ein Galvanometer und eine Batterie zu diesem Zwecke vorher einzurichten. In diesem Falle, finden wir, ist die beste Anordnung

$$S = R, \quad B = \frac{1}{2}R, \quad G = 2n(1 - n)R,$$

und $G = \frac{1}{2}R$, wenn $n = \frac{1}{2}$ ist.

Über die Anwendung der Wheatstoneschen Methode.

224. Wir haben bisher die allgemeine Theorie der Wheatstoneschen Brücke erörtert, wir wollen jetzt einige ihrer Anwendungen betrachten.

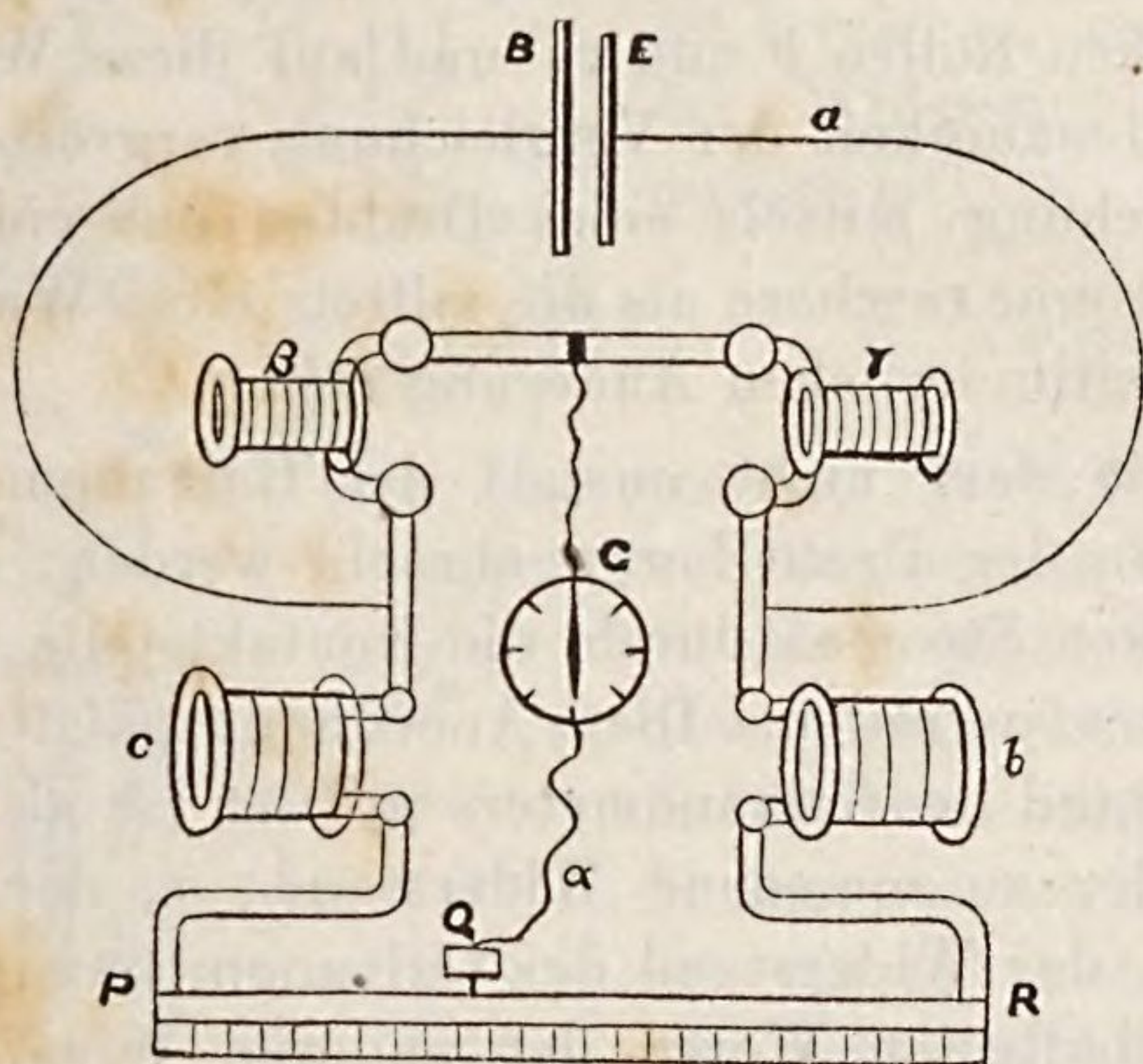
Die grösste Genauigkeit ist erreichbar, wenn man zwei gleiche Widerstände zu vergleichen hat.

Wir wollen annehmen, dafs β eine Normalwiderstandsrolle ist, und dafs wir γ so abzugleichen wünschen, dafs sein Widerstand dem von β gleich ist.

Zwei andere Rollen, b und c , welche einander gleich oder nahezu gleich sind, werden vorbereitet und die vier Rollen werden mit ihren Elektroden in Quecksilbernäpfchen gebracht, so dafs der Batteriestrom sich zwischen zwei Zweige teilt, von denen der eine aus β und γ und der andere aus b und c besteht. Die Rollen b und c werden durch einen Draht PR verbunden, der so gleichförmig wie möglich in seinem Widerstande ist und mit einer in gleiche Teile geteilten Skala versehen wird.

Der Galvanometerdraht verbindet die Verbindungsstelle von β und γ mit einem Punkte Q des Drahtes PR und der Berührungspunkt Q wird so lange variiert, bis man keinen Ausschlag der Galvanometernadel mehr beobachten kann, wenn man zuerst den Batteriekreis und dann den Galvanometerkreis schließt.

Fig. 49.



Dann vertauscht man die Lagen von β und γ und findet so eine neue Lage von Q . Wenn diese neue Lage dieselbe ist, wie die alte, dann wissen wir, daß die Vertauschung von β und γ keine Änderung in den Verhältnissen der Widerstände hervorgebracht hat und daß daher γ richtig abgeglichen ist. Wenn Q sich geändert hat, so wird die Richtung und Gröfse dieser Änderung die Art und die Gröfse der Längenänderung des Drahtes von γ angeben, welche dessen Widerstand gleich dem von β machen wird.

Wenn die Widerstände der Rollen b und c , bei jeder mit inbegriffen den Teil des Drahtes PR bis zu seinem Nullpunkt, gleich den Widerständen von b resp. c Teilen des Drahtes selbst sind, wenn ferner x der Skalenteil von Q in dem ersten und y in dem zweiten Falle ist, so ist

$$\frac{c + x}{b - x} = \frac{\beta}{\gamma}, \quad \frac{c + y}{b - y} = \frac{\gamma}{\beta},$$

folglich

$$\frac{\gamma^2}{\beta^2} = 1 + \frac{(b + c)(y - x)}{(c + x)(b - y)}.$$

Da $b - y$ nahezu gleich $c + x$ ist und beide groß gegen x oder y sind, so können wir dies schreiben

$$\frac{\gamma^2}{\beta^2} = 1 + 4 \frac{y - x}{b + c},$$

und

$$\gamma = \beta \left(1 + 2 \frac{y - x}{b + c} \right).$$

Wenn γ so gut abgeglichen ist, als wir es thun können, dann substituieren wir für b und c andere Rollen von (z. B.) zehnmal grösserem Widerstande.

Die übrig gebliebene Differenz zwischen β und γ wird jetzt eine zehnmal grössere Differenz in der Lage von Q hervorbringen, als bei den ursprünglichen Rollen b und c , und auf diese Weise können wir allmählich die Genauigkeit der Vergleichung vergrössern.

Die Abgleichung mittels eines Drahtes mit einem schleifenden Kontaktstück ist eine raschere als die mittels eines Widerstandskastens und ist einer kontinuierlichen Änderung fähig.

Die Batterie darf nicht anstatt des Galvanometers mit einem Schleifkontakt an den Draht herangebracht werden; denn der Durchgang eines starken Stromes durch die Kontaktstelle würde die Oberfläche des Drahtes angreifen. Diese Anordnung paßt also für den Fall, daß der Widerstand des Galvanometers grösser ist als der der Batterie.

Wenn γ , der zu messende Widerstand, a , der Widerstand der Batterie, und α , der Widerstand des Galvanometers, gegeben sind, so sind die vorteilhaftesten Werte der anderen Widerstände, wie Mr. Oliver Heaviside gezeigt hat (Phil. Mag., Febr. 1873)

$$c = \sqrt{a\alpha}, \quad b = \sqrt{a\gamma \frac{\alpha + \gamma}{a + \gamma}}, \quad \beta = \sqrt{\alpha\gamma \frac{a + \gamma}{\alpha + \gamma}}.$$

Thomson's Methode zur Bestimmung des Widerstandes des Galvanometers ¹⁾.

225. Eine der Wheatstoneschen Brücke ähnliche Anordnung ist mit Vorteil von Sir W. Thomson zur Bestimmung des Widerstandes des Galvanometers angewendet worden, wenn es gerade im Gebrauch ist. Sir W. Thomson kam darauf durch die Mance'sche Methode (S. Art. 226).

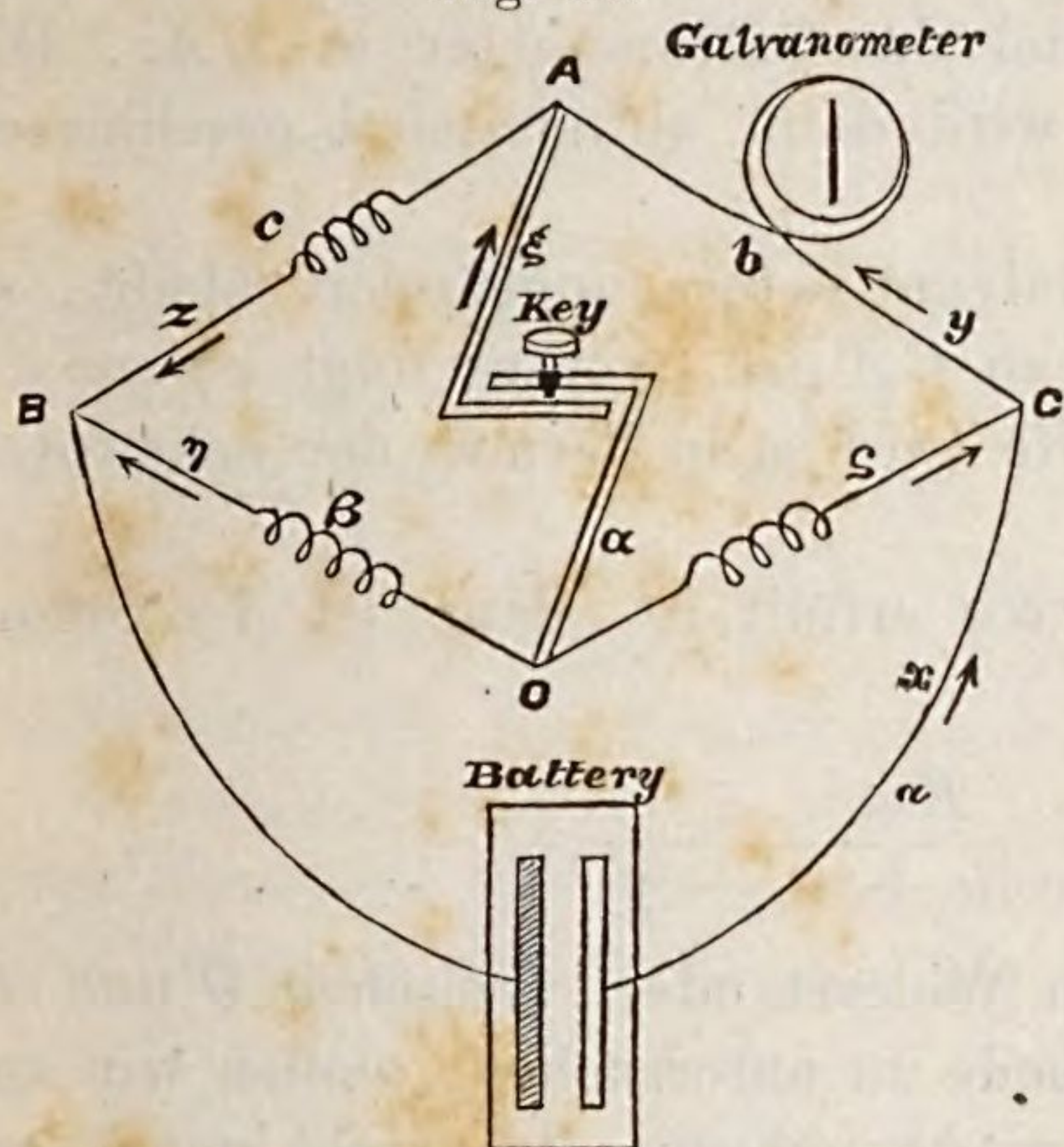
Die Batterie sei, wie früher, zwischen B und C in der Figur des Artikels 221 angebracht, aber das Galvanometer befinde sich in CA statt in OA .

Wenn $b\beta - c\gamma$ Null ist, dann ist der Leiter OA konjugiert zu BC und, da in OA kein Strom vorhanden ist, der durch die Batterie in BC hervorgerufen ist, so ist die Stärke des Stromes in jedem andern Leiter unabhängig von dem Widerstande in OA . Wenn daher das

¹⁾ Proc. R. S., 19. Jan. 1871.

Galvanometer in CA steht, so wird seine Ablenkung dieselbe bleiben, ob der Widerstand in OA groß oder klein ist. Wir beobachten daher, ob die Ablenkung des Galvanometers dieselbe bleibt, wenn einmal O und A durch einen Leiter von kleinem Widerstande verbunden sind, und dann diese Verbindung unterbrochen ist, und wenn wir durch

Fig. 50.



passende Abgleichung der Widerstände der Leiter dieses Resultat erreichen, so wissen wir, daß der Widerstand des Galvanometers ist

$$b = \frac{c\gamma}{\beta},$$

wo c , γ und β Widerstandsrollen von bekanntem Widerstand sind.

Man wird bemerken, daß, obwohl dies keine Nullmethode in dem Sinne ist, daß kein Strom in dem Galvanometer vorhanden ist, sie es doch in dem Sinne ist, daß die beobachtete That-

sache eine negative ist, nämlich daß der Ausschlag des Galvanometers sich nicht ändert, wenn ein gewisser Kontakt gemacht wird. Eine Beobachtung dieser Art ist von größerem Wert als eine Beobachtung der Gleichheit zweier Ausschläge desselben Galvanometers, denn in dem letzteren Falle kann sich in der Zwischenzeit die Stärke der Batterie oder die Empfindlichkeit des Galvanometers ändern, während, wenn die Ablenkung, trotz gewisser Änderungen, die wir nach Belieben wiederholen können, konstant bleibt, wir sicher sind, daß der Strom ganz unabhängig von diesen Änderungen ist.

Die Bestimmung des Widerstandes einer Galvanometerrolle kann leicht auf dem gewöhnlichen Wege ausgeführt werden, indem man die Wheatstonesche Brücke macht und ein anderes Galvanometer in OA setzt. Durch die eben beschriebene Methode wird das Galvanometer selbst benutzt, um seinen eigenen Widerstand zu bestimmen.

Mance's Methode zur Bestimmung des Widerstandes der Batterie¹⁾.

226. Die Messung des Widerstandes einer Batterie, wenn sie in Wirksamkeit ist, ist sehr viel schwieriger, da der Widerstand der Batterie eine Zeit lang, nachdem die Stärke des durch sie gehenden

¹⁾ Proc. R. S., 19. Jan. 1871.

Stromes geändert worden ist, sich beträchtlich ändert. Bei einigen der gewöhnlich angewendeten Methoden zur Messung des Widerstandes einer Batterie treten solche Änderungen der Stärke des Stromes in der Batterie während der Operationen auf und daher werden die Resultate zweifelhaft.

In der Mance'schen Methode, welche von diesem Einwurf frei ist, steht die Batterie in BC und das Galvanometer in CA . Die Verbindung zwischen O und B wird dann abwechselnd geschlossen und geöffnet.

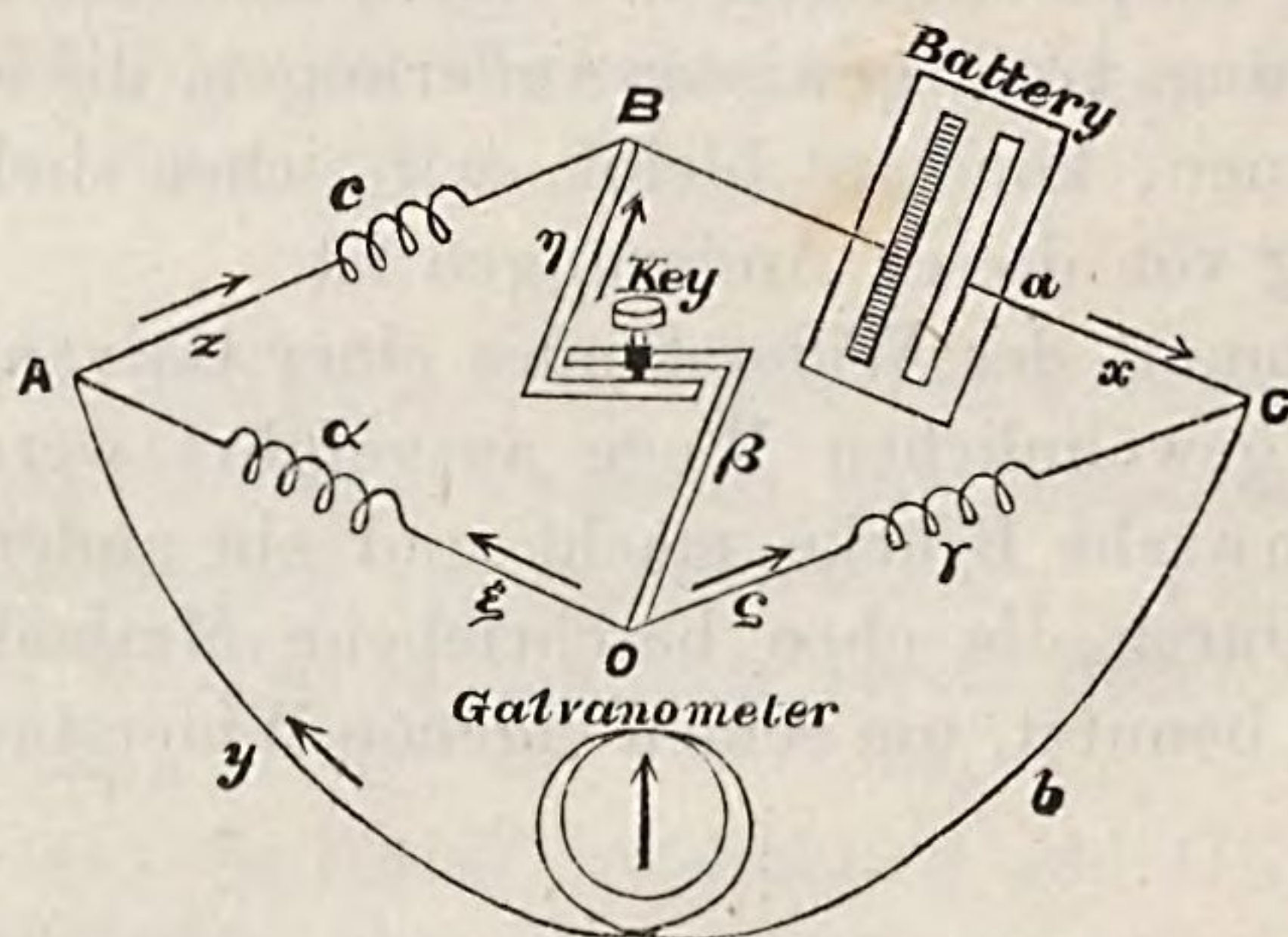
Wenn die Ablenkung des Galvanometers ungeändert bleibt, so wissen wir, daß OA konjugiert zu CA ist, woraus folgt $c\gamma = a\alpha$ und a , der Widerstand der Batterie wird so in Termen der bekannten Widerstände c, γ, α erhalten.

Wenn die Bedingung $c\gamma = a\alpha$ erfüllt ist, dann ist der Strom im Galvanometer

$$y = \frac{E\alpha}{b\alpha + c(b + \alpha + \gamma)},$$

und dies ist unabhängig von dem Widerstande β zwischen O und B . Um die Empfindlichkeit der Methode zu untersuchen, wollen wir annehmen, daß die Bedingung $c\gamma = a\alpha$ nahezu, aber nicht genau erfüllt ist und daß y_0 der Strom im Galvanometer ist, wenn O und B durch einen Leiter von nicht merklichem Widerstande verbunden sind, während y_1 der Strom ist, wenn O und B vollständig getrennt sind.

Fig. 51.



Um diese Werte zu finden, müssen wir in der allgemeinen Formel für y zuerst β gleich 0 und dann gleich ∞ machen und die Resultate vergleichen.

Auf diese Weise finden wir

$$\frac{y_0 - y_1}{y} = \frac{\alpha}{\gamma} \frac{c\gamma - a\alpha}{(c + \alpha)(\alpha + \gamma)},$$

wobei wir annehmen, daß y_0 und y_1 so nahe einander gleich sind, daß wir, wenn ihre Differenz nicht in Frage kommt, jedes von ihnen gleich y setzen können, gleich dem Werte des Stromes, wenn die Abgleichung eine vollkommene ist.

Der Widerstand c des Leiters AB sollte zweckmäfsig gleich a , dem der Batterie sein, α und γ sollten gleich und so klein wie möglich sein und b sollte gleich $\alpha + \gamma$ sein.

Da ein Galvanometer am empfindlichsten ist, wenn seine Ablenkung klein ist, so ist es zweckmäfsig, daß wir die Nadel durch feste Magnete nahezu auf Null bringen, bevor wir zwischen O und B Kontakt machen.

Bei dieser Methode, den Widerstand der Batterie zu messen, wird der Strom in der Batterie während der Operation gar nicht beeinflusst, so daß wir ihren Widerstand für jede beliebige Stromstärke bestimmen können und dadurch finden können, wie die Stärke des Stromes den Widerstand beeinflusst.

Wenn y der Strom in dem Galvanometer ist, so ist der wirkliche Strom durch die Batterie x_0 , wenn der Schlüssel hinuntergedrückt ist, und x , wenn er aufgehoben ist, worin

$$x_0 = y \left(1 + \frac{b}{\alpha + \gamma} \right), \quad x_1 = y \left(1 + \frac{b}{\gamma} + \frac{\alpha c}{\gamma (\alpha + c)} \right)$$

ist. Der Widerstand der Batterie ist

$$a = \frac{c\gamma}{\alpha},$$

und die elektromotorische Kraft der Batterie ist

$$E = y \left(b + c + \frac{c}{\alpha} (b + \gamma) \right).$$

Die in Art. 225 auseinandergesetzte Methode, um den Widerstand des Galvanometers zu finden, unterscheidet sich von dieser nur dadurch, daß der Kontakt dort zwischen O und A geschlossen und unterbrochen wird, anstatt zwischen O und B , und wenn wir α und β vertauschen, erhalten wir für diesen Fall

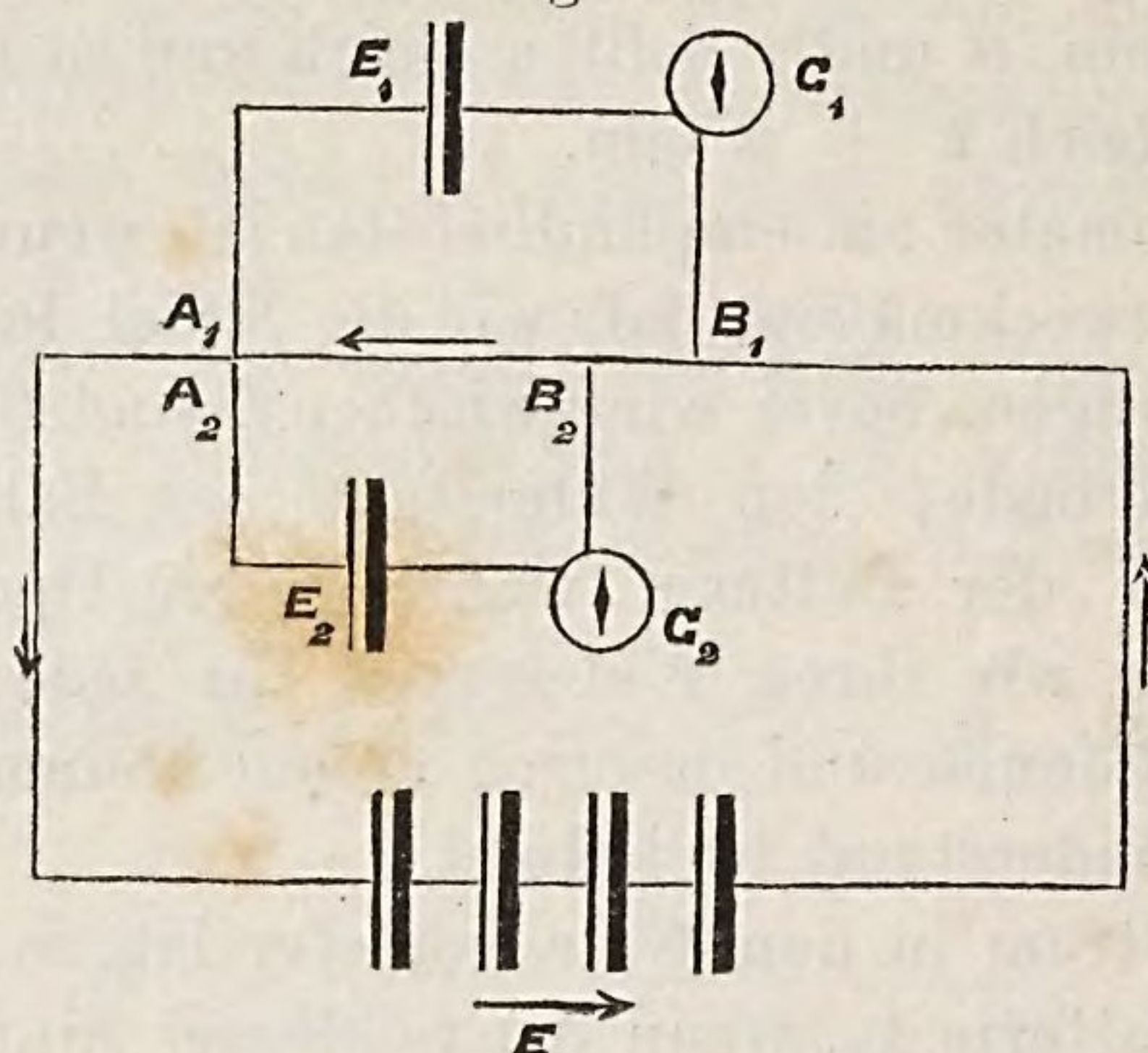
$$\frac{y_0 - y_1}{y} = \frac{\beta}{\gamma} \frac{c\gamma - b\beta}{(c + \beta)(\beta + \gamma)}.$$

Über die Vergleichung elektromotorischer Kräfte.

227. Die folgende Methode, die elektromotorischen Kräfte von Volta'schen und thermoelektrischen Säulen zu vergleichen, wenn kein Strom durch sie fließt, erfordert nur eine Reihe von Widerstandsrollen und eine konstante Batterie.

Es sei E , die elektromotorische Kraft der Batterie, gröfser als die elektromotorische Kraft jedes der zu vergleichenden Elemente, dann kann, wenn ein hinreichender Widerstand R_1 zwischen den Punkten A_1, B_1 des primären Stromkreises EB_1A_1E eingeschaltet

Fig. 52.



wird, die elektromotorische Kraft von B_1 nach A_1 gleich der des Elementes E_1 gemacht werden. Wenn die Elektroden dieses Elements jetzt mit den Punkten A_1, B_1 verbunden werden, so wird kein Strom durch das Element fließen. Bringt man ein Galvanometer G_1 in den Kreis des Elementes E_1 und verändert man den Widerstand zwischen A_1 und B_1 so lange, bis das Galvanometer G_1 keinen Strom anzeigt, so erhält man die Gleichung

$$E_1 = R_1 C,$$

wo R_1 der Widerstand zwischen A_1 und B_1 und C die Stärke des Stromes in dem primären Stromkreise ist.

Wenn wir ebenso ein zweites Element E_2 nehmen und seine Elektroden nach A_2 und B_2 bringen, so daß durch das Galvanometer G_2 kein Strom angezeigt wird, so ist

$$E_2 = R_2 C,$$

wo R_2 der Widerstand zwischen A_2 und B_2 ist. Wenn die Beobachtungen der Galvanometer G_1 und G_2 gleichzeitig angestellt werden, so ist der Wert von C , der Wert des Stromes in dem primären Stromkreise, derselbe in beiden Gleichungen und wir finden

$$E_1 : E_2 = R_1 : R_2.$$

Auf diese Weise kann die elektromotorische Kraft zweier Elektromotoren verglichen werden ¹⁾. Die absolute elektromotorische Kraft eines Elektromotors kann entweder elektrostatisch durch ein Elektrometer

¹⁾ Eine beliebige Anzahl von Batterien kann mit Hülfe eines einzigen Galvanometers verglichen werden, wenn ein Pol jeder Batterie mit derselben Elektrode des Galvanometers verbunden wird, während die anderen Pole

oder elektromagnetisch durch ein absolutes Galvanometer gemessen werden.

Diese Methode, bei welcher zur Zeit der Vergleichung durch keinen von den Elektromotoren ein Strom geht, ist eine Modifikation der Poggendorffschen Methode und rührt von Mr. Latimer Clark her, der auf diese Weise folgende Werte der elektromotorischen Kräfte gefunden hat:

			Konzen- trierte Lö- sung von	Volts
Daniell	I	Amalgamiertes Zink	$\text{H}_2\text{SO}_4 + 4 \text{Aq}$	CuSO_4 Kupfer 1,079
"	II	"	$\text{H}_2\text{SO}_4 + 12 \text{Aq}$	CuSO_4 Kupfer 0,978
"	III	"	$\text{H}_2\text{SO}_4 + 12 \text{Aq}$	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ Kupfer 1,000
Bunsen	I	"	"	HNO_3 Kohle 1,964
"	II	"	"	sp. G. 1,38 Kohle 1,888
Grove	. .	"	$\text{H}_2\text{SO}_4 + 4 \text{Aq}$	HNO_3 Platin 1,956

Ein Volt ist eine elektromotorische Kraft gleich 100 000 000 Einheiten des Zentimeter - Gramm - Sekunden - Systems.

durch besondere Schlüssel mit den Punkten A_1 , A_2 u. s. w. auf dem Drahte verbunden werden und die Schlüssel hintereinander, aber in rascher Folge, heruntergedrückt werden.

Dreizehntes Kapitel.

Über den elektrischen Widerstand der Substanzen.

228. Drei Klassen sind es, in welche wir die verschiedenen Substanzen in Bezug auf den Durchgang der Elektrizität durch sie einordnen können.

Die erste Klasse enthält alle Metalle und ihre Legierungen, einige Schwefelmetalle und andere Metallverbindungen. Auch Kohle in der Form der Gaskohle und Selen in der krystallinischen Form müssen wir zu dieser Klasse rechnen.

In allen diesen Substanzen findet Leitung statt ohne jede Zersetzung oder Änderung der chemischen Natur der Substanz, weder im Innern, noch da, wo der Strom in den Körper ein- oder aus ihm austritt. Bei allen wächst der Widerstand, wenn die Temperatur steigt¹⁾.

Die zweite Klasse besteht aus den Substanzen, welche Elektrolyte genannt werden, weil der Strom mit einer Zerlegung der Substanz in zwei Komponenten verbunden ist, welche an den Elektroden auftreten. Im Allgemeinen ist eine Substanz ein Elektrolyt nur, wenn sie in flüssiger Form ist, obwohl gewisse kolloide Substanzen, wie Glas bei 100°, welche offenbar fest sind, Elektrolyten sind. Nach den Experimenten von Sir B. C. Brodie scheint es, daß gewisse Gase durch eine starke elektromotorische Kraft der Elektrolyse fähig sind.

Bei allen Substanzen, welche durch Elektrolyse leiten, nimmt der Widerstand ab, wenn die Temperatur steigt.

Die dritte Klasse besteht aus Substanzen, deren Widerstand so groß ist, daß es nur durch die allerfeinsten Methoden möglich ist, den Durchgang der Elektrizität durch sie zu entdecken. Diese werden Dielektrika genannt.

¹⁾ Bei der Kohle findet das Umgekehrte statt. G.

Zu dieser Klasse gehörte eine beträchtliche Anzahl von festen Körpern, von denen einige im geschmolzenen Zustande Elektrolyte sind, ferner einige Flüssigkeiten, wie Terpentin, Naphta, geschmolzenes Paraffin und alle Gase und Dämpfe. Kohle in der Form als Diamant und Selen in der amorphen Form gehören zu dieser Klasse.

Der Widerstand dieser Klasse von Körpern ist enorm gegen den der Metalle. Er nimmt ab, wenn die Temperatur steigt. Es ist in Folge des großen Widerstandes dieser Substanzen schwierig, zu bestimmen, ob der schwache Strom, welchen wir durch sie hindurch bringen können, mit Elektrolyse verbunden ist oder nicht.

Über den elektrischen Widerstand der Metalle.

229. Es gibt keinen Zweig von elektrischen Untersuchungen, in welchem zahlreichere oder genauere Experimente gemacht worden sind, als in der Bestimmung des Widerstandes von Metallen. Es ist von der äußersten Wichtigkeit für die elektrische Telegraphie, daß das Metall, aus welchem die Drähte gemacht werden, den kleinsten erreichbaren Widerstand habe. Es müssen daher Messungen des Widerstandes angestellt werden, bevor man die Stoffe auswählt. Wenn irgend ein Fehler auf der Linie vorkommt, so wird sein Ort sofort durch Widerstandsmessung bestimmt und diese Messungen, zu welchen so viele Personen jetzt gebraucht werden, erfordern die Anwendung von Widerstandsrollen, die aus Metall gefertigt sind, dessen elektrische Eigenschaften sorgfältig untersucht worden sind.

Die elektrischen Eigenschaften der Metalle und ihrer Legierungen sind mit der größten Sorgfalt von Matthiessen, Vogt und Hockin studiert worden und von den Gebrüdern Siemens, die so viel für die Einführung genauer elektrischer Messungen in den praktischen Dienst gethan haben.

Es ergibt sich aus den Untersuchungen von Dr. Matthiessen, daß die Wirkung der Temperatur auf den Widerstand nahezu dieselbe für eine beträchtliche Anzahl der reinen Metalle ist, indem nämlich der Widerstand bei 100°C . sich zu dem bei 0°C . wie 1,414 zu 1 oder wie $1 : 0,707$ verhält. Für reines Eisen ist das Verhältniß 1,645 und für reines Thallium 1,458.

Der Widerstand der Metalle wurde von Dr. C. W. Siemens¹⁾ in einem viel weiteren Temperaturintervall untersucht, nämlich vom Gefrierpunkt bis zu 350° und in einigen Fällen bis zu 1000° . Er findet, daß der Widerstand wächst, wenn die Temperatur steigt, aber daß das Verhältniß dieses Anwachsens abnimmt, wenn die Temperatur

¹⁾ Proc. R. S., 27. April 1871.

steigt. Die Formel, welche, wie er findet, sehr nahe sowohl mit den bei niederen Temperaturen von Dr. Matthiessen, als mit seinen eigenen in einem Intervall von 1000°C . beobachteten Widerständen übereinstimmt, ist

$$r = \alpha T^{1/2} + \beta T + \gamma,$$

wo T die absolute Temperatur, gerechnet von -273°C . ist und α , β , γ Konstanten sind. Zum Beispiel ist für

$$\text{Platin . . . } r = 0,039369 T^{1/2} + 0,00216407 T - 0,2413$$

$$\text{Kupfer . . . } r = 0,026577 T^{1/2} + 0,0031443 T - 0,22751$$

$$\text{Eisen . . . } r = 0,072545 T^{1/2} + 0,0038133 T - 0,23971.$$

Aus Angaben dieser Art kann man die Temperatur eines Ofens bestimmen, indem man den Widerstand eines Platindrahtes misst, den man in den Ofen bringt.

Dr. Matthiessen fand, daß wenn zwei Metalle zu einer Legierung verbunden werden, der Widerstand der Legierung in den meisten Fällen größer ist, als er aus dem Widerstand der komponierenden Metalle und ihren Verhältnissen sich berechnet. Bei den Legierungen von Gold und Silber ist der Widerstand der Legierung größer als der von reinem Gold und als der von reinem Silber und innerhalb gewisser Grenzverhältnisse der Konstituenten variiert er sehr wenig bei einer kleinen Änderung der Verhältniszahlen. Aus diesem Grunde empfahl Dr. Matthiessen eine Legierung von zwei Gewichtsteilen Gold und einem Gewichtsteile Silber als Material zur Herstellung der Widerstandseinheit.

Die Wirkung einer Temperaturänderung auf den elektrischen Widerstand ist bei Legierungen im Allgemeinen kleiner als bei reinen Metallen.

Deswegen werden gewöhnlich die Widerstandsrollen aus Neusilber gemacht, wegen des großen Widerstandes desselben und der geringen Änderung desselben mit der Temperatur.

Auch eine Legierung von Silber und Platin wird für Normalrollen benutzt.

230. In der folgenden Tabelle ist R der Widerstand in Ohms einer Säule von einem Meter Länge und einem Gramm Gewicht bei 0°C . und r ist der Widerstand in Zentimetern per Sekunde von einem Kubikzentimeter nach den Experimenten von Matthiessen¹⁾:

¹⁾ Phil. Mag., Mai 1865.

	Spezif. Gew.		R	r	Prozentische Zunahme des Wider- standes für 1° C. bei 20° C.
Silber	10,50	gezogen	0,1689	1609	0,377
Kupfer	8,95	„	0,1469	1642	0,388
Gold	19,27	„	0,4150	2154	0,365
Blei	11,391	gewalzt	2,257	19847	0,387
Quecksilber . . .	13,595	flüssig	13,071	96146	0,072
2 Th. Gold, 1 Silber	15,218	hart oder gegläht	1,668	10988	0,065
Selen bei 100° C. .	—	krystallinisch	—	6×10^{13}	1,00

Man ersieht aus den Untersuchungen von Matthiessen und Hockin, daß der Widerstand einer Säule von Quecksilber von 1 m Länge und 1 g Gewicht bei 0° C. gleich 13,071 Ohms ist, woraus folgt, daß, wenn das spezifische Gewicht des Quecksilbers 13,595 ist, der Widerstand einer Säule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt gleich 0,96146 Ohm ist.

Über den elektrischen Widerstand von Elektrolyten.

231. Die Messung des elektrischen Widerstandes von Elektrolyten wird schwierig in Folge der Polarisation der Elektroden, welche bewirkt, daß die beobachtete Potentialdifferenz der metallischen Elektroden größer ist als die elektromotorische Kraft, welche wirklich den Strom hervorbringt.

Diese Schwierigkeit kann auf verschiedene Weise überwunden werden. In gewissen Fällen können wir uns von der Polarisation befreien, indem wir Elektroden aus passendem Material benutzen, wie z. B. Zinkelektroden in einer Lösung von Zinksulfat. Wenn wir die Oberfläche der Elektroden sehr groß gegen den Querschnitt desjenigen Teiles des Elektrolyten machen, dessen Widerstand gemessen werden soll, und wenn wir nur Ströme von kurzer Dauer abwechselnd in entgegengesetzten Richtungen anwenden, so können wir die Messungen ausführen, bevor durch den Durchgang des Stromes eine beträchtliche Polarisation erregt ist.

Endlich können wir auch die Wirkung der Polarisation dadurch eliminieren, daß wir zwei verschiedene Experimente anstellen und zwar so, daß bei dem einen der Weg des Stromes durch den Elektrolyten viel länger ist als bei dem andern und daß wir die elektro-

motorische Kraft so abgleichen, daß der wirkliche Strom ebenso wie die Zeit, während welcher er fließt, in beiden Fällen nahezu dieselben sind.

232. Bei den Experimenten von Dr. Paalzow¹⁾ hatten die Elektroden die Form von großen Platten und befanden sich in getrennten, flachen Gefäßen, die mit dem Elektrolyten gefüllt waren; die Verbindung wurde durch einen langen Heber hergestellt, der mit dem Elektrolyten gefüllt war und in beide Gefäße tauchte. Es wurden zwei solche Heber von verschiedener Länge benutzt.

Die beobachteten Widerstände des Elektrolyten in diesen Hebern waren R_1 und R_2 . Die Heber wurden dann mit Quecksilber gefüllt und ihre Widerstände, wenn sie mit Quecksilber gefüllt waren, gleich R'_1 und R'_2 gefunden.

Das Verhältnis des Widerstandes des Elektrolyten zu dem Widerstande einer Quecksilbermasse von derselben Form bei 0° C. wurde dann nach der Formel gefunden

$$\varrho = \frac{R_1 - R_2}{R'_1 - R'_2}.$$

Um aus den Werten von ϱ den Widerstand eines Würfels von einem Zentimeter Länge und einem Quadratcentimeter Querschnitt zu finden, müssen wir sie mit dem Werte von r für Quecksilber von 0° C. multiplizieren. S. Art. 230.

Die von Paalzow gegebenen Resultate sind folgende:

Mischungen von Schwefelsäure und Wasser.

	Temp.	Widerstand verglichen mit Quecksilber
H ₂ SO ₄	15° C.	96 950
H ₂ SO ₄ + 14 H ₂ O . . .	19° C.	14 157
H ₂ SO ₄ + 13 H ₂ O . . .	22° C.	13 310
H ₂ SO ₄ + 499 H ₂ O . . .	22° C.	184 773

Zinksulfat und Wasser.

ZnSO ₄ + 23 H ₂ O . . .	23° C.	194 400
ZnSO ₄ + 24 H ₂ O . . .	23° C.	191 000
ZnSO ₄ + 105 H ₂ O . . .	23° C.	354 000

Kupfersulfat und Wasser.

CuSO ₄ + 45 H ₂ O . . .	22° C.	202 410
CuSO ₄ + 105 H ₂ O . . .	22° C.	339 341

Magnesiumsulfat und Wasser.

MgSO ₄ + 34 H ₂ O . . .	22° C.	199 180
MgSO ₄ + 107 H ₂ O . . .	22° C.	324 600

¹⁾ Berliner Monatsberichte, Juli 1868.

Chlorwasserstoffsäure und Wasser.

	Temp.	Widerstand verglichen mit Quecksilber.
HCl + 15 H ₂ O	23° C.	13 626
HCl + 500 H ₂ O	23° C.	86 679

233. F. Kohlrausch und W. A. Nippoldt¹⁾ haben den Widerstand von Mischungen von Schwefelsäure und Wasser bestimmt. Sie wendeten magnetelektrische Wechselströme an, deren elektromotorische Kraft von $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{74}$ eines Groveschen Elementes variierte, und durch ein thermoelektrisches Kupfer-Eisen-Element reduzierten sie die elektromotorische Kraft bis auf $\frac{1}{429000}$ einer Groveschen Zelle. Sie fanden, daß das Ohmsche Gesetz auf den Elektrolyten in dem ganzen Intervall dieser elektromotorischen Kräfte anwendbar war.

Der Widerstand ist ein Minimum in einer Mischung, die ungefähr $\frac{1}{3}$ Schwefelsäure enthält.

Der Widerstand der Elektrolyte nimmt ab, wenn die Temperatur steigt. Der prozentische Zuwachs der Leitungsfähigkeit für eine Temperaturerhöhung von 1° C. ist in der folgenden Tabelle gegeben.

Widerstand von Mischungen von Schwefelsäure und Wasser bei 22° C. ausgedrückt durch den Widerstand des Quecksilbers bei 0° C. als Einheit.
(Kohlrausch und Nippoldt.)

Spezifisches Gewicht bei 18,5°	Prozentgehalt an H ₂ SO ₄	Widerstand bei 22° C. (Hg = 1)	Prozent. Zuwachs der Leitungsfähigkeit für 1° C.
0,9985	0,0	746 300	0,47
1,00	0,2	465 100	0,47
1,0504	8,3	34 530	0,653
1,0989	14,2	18 946	0,646
1,1431	20,2	14 990	0,799
1,2045	28,0	13 133	1,317
1,2631	35,2	13 132	1,259
1,3163	41,5	14 286	1,410
1,3547	46,0	15 762	1,674
1,3994	50,4	17 726	1,582
1,4482	55,2	20 796	1,417
1,5026	60,3	25 574	1,794

¹⁾ Pogg. Ann. 138, S. 286, Oktober 1869.

Über den elektrischen Widerstand der Dielektrika.

234. Eine große Zahl von Bestimmungen des Widerstandes von Guttapercha und von anderen Stoffen, die als isolierende Media benutzt werden, wurde in den Fabriken für Telegraphenkabel angestellt, um den Wert dieser Substanzen als Isolatoren zu bestimmen.

Die Prüfung wird mit dem Material im Allgemeinen vorgenommen, nachdem es zur Bedeckung des leitenden Drahtes benutzt wurde, wobei dann der Draht als eine Elektrode und das Wasser eines Bassins, in welches der Kabel eingetaucht wird, als andere Elektrode benutzt wird. So läßt man den Strom durch einen Hohlzylinder des Isolators von großer Fläche und geringer Dicke hindurchgehen.

Es wurde gefunden, daß, wenn die elektromotorische Kraft zu wirken anfängt, der Strom, wie er durch das Galvanometer angezeigt wird, durchaus nicht konstant ist. Die erste Wirkung ist natürlich ein hindurchgehender Strom von beträchtlicher Intensität, dessen gesamte Elektrizitätsmenge diejenige ist, die erfordert wird, um die Oberflächen des Isolators mit der Oberflächenverteilung der Elektrizität zu versehen, die der elektromotorischen Kraft entspricht. Dieser erste Strom ist daher nicht ein Maass für die Leitungsfähigkeit, sondern für die Kapazität der isolierenden Schicht.

Aber selbst, nachdem man diesen Strom hat ablaufen lassen, ist der übrigbleibende Strom nicht konstant und zeigt nicht die wahre Leitungsfähigkeit der Substanz an. Man fand, daß der Strom noch immer weiter abnimmt, wenigstens eine halbe Stunde lang, so daß eine Bestimmung des Widerstandes aus der Stromstärke einen größeren Wert geben wird, wenn man eine gewisse Zeit verstreichen läßt, als wenn man sie sofort nach dem Schließen der Batterie vornimmt.

So war z. B. mit Hoopers isolierendem Material der scheinbare Widerstand nach Verlauf von zehn Minuten viermal und nach Verlauf von 19 Stunden dreiundzwanzigmal so groß als der Widerstand, der nach einer Minute beobachtet wurde. Wenn die Richtung der elektromotorischen Kraft umgekehrt wird, wird der Widerstand ebenso klein oder noch kleiner als zuerst und steigt dann allmählich.

Diese Erscheinungen scheinen von einem Zustande der Guttapercha herzurühren, welchen wir, in Ermangelung eines besseren Namens, Polarisation nennen können, und welchen wir einerseits mit dem Zustande einer Reihe kaskadenförmig geladener Leydener Flaschen vergleichen können, und andererseits mit Ritters sekundärer Säule.

Wenn eine Anzahl von Leydener Flaschen von großer Kapazität hinter einander durch Leiter von grossem Widerstand verbunden werden (z. B. durch feuchte Schnüre wie in den Experimenten von Gaugain), dann wird eine elektromotorische Kraft, die auf die Batterie wirkt, einen Strom hervorbringen, der am Galvanometer eine allmähliche Abnahme zeigen wird, so lange bis die Flaschen völlig geladen sind.

Der scheinbare Widerstand einer solchen Batterie wird wachsen, und wenn das Dielektrikum der Flaschen ein vollkommener Isolator ist, wird er ohne Grenze wachsen. Wenn man dann die elektromotorische Kraft entfernt und zwischen den Enden der Batterie eine Verbindung herstellt, so wird man einen entgegengesetzten Strom beobachten, dessen gesamte Elektrizitätsmenge im Falle vollkommener Isolation dieselbe sein wird, als die des direkten Stromes. Ebensolche Wirkungen wird man bei einer sekundären Säule beobachten mit dem Unterschiede, daß die schließliche Isolation nicht so gut und daß die Kapazität pro Flächeneinheit unendlich viel größer ist.

Bei einem mit Guttapercha umhüllten Kabel fand man, daß, wenn man die Batterie eine halbe Stunde lang wirken läßt und dann den Draht mit der äußeren Elektrode verbindet, daß dann ein umgekehrter Strom vorhanden ist, welcher eine Zeit lang fließt und allmählich das System auf seinen ursprünglichen Zustand zurückbringt.

Diese Erscheinungen sind von derselben Art wie die als „Rückstandsentladung“ bei einer Leydener Flasche bezeichneten, nur daß der Betrag der Polarisation viel größer in Guttapercha u. s. w. als in Glas ist.

Dieser Polarisationszustand scheint eine Eigenschaft des Materials zu sein, welche mit einer Richtung der Teilchen zusammenhängt, und scheint zu seiner Entstehung nicht nur eine elektromotorische Kraft zu erfordern, sondern den Durchgang einer beträchtlichen Menge Elektrizität, sei es durch Verrückung oder auf andere Weise, und dieser Durchgang erfordert eine beträchtliche Zeit. Wenn der Polarisationszustand eingetreten ist, ist eine innere elektromotorische Kraft vorhanden, die in der Substanz in umgekehrter Richtung wirkt, und welche weiter wirkt, entweder bis sie einen entgegengesetzten Strom hervorgebracht hat, der dem ersten an gesamter Elektrizitätsmenge gleich ist oder bis der Zustand der Polarisation langsam in Folge wirklicher Leitung durch die Substanz aufgehört hat.

Die ganze Theorie von dem, was man Rückstand, elektrische Absorption, Elektrisierung oder Polarisation nennt, erfordert noch eine sorgfältige Untersuchung und wird wahrscheinlich zu wichtigen Entdeckungen über die innere Struktur der Körper führen.

235. Der Widerstand der meisten Dielektrika nimmt ab, wenn die Temperatur steigt.

So ist der Widerstand der Guttapercha ungefähr zwanzigmal so groß bei 0°C. als bei 24°C. Die Herren Bright und Clark haben gefunden, daß die folgende Formel Resultate gibt, die mit ihren Experimenten übereinstimmen. Wenn r der Widerstand der Guttapercha bei der Temperatur T (Celsius-Grade) ist, dann ist der Widerstand bei der Temperatur $T + t$

$$R = r \times 0,8878^t$$

Die Zahl variiert zwischen 0,8878 und 0,9.

Hockin hat die sonderbare Thatsache gefunden und geprüft, daß erst einige Stunden, nachdem die Guttapercha ihre Temperatur angenommen hat, der Widerstand den entsprechenden Wert erlangt.

Der Einfluß der Temperatur auf den Widerstand von Kautschuk ist nicht so groß, als auf den von Guttapercha.

Der Widerstand der Guttapercha wächst beträchtlich bei Anwendung von Druck.

Der Widerstand, in Ohms, eines Kubikmeters verschiedener Proben von Guttapercha, wie sie bei verschiedenen Kabeln benutzt sind, ist folgender ¹⁾:

Name des Kabels	
Rotes Meer	$0,267 \times 10^{12}$ bis $0,362 \times 10^{12}$
Malta - Alexandria	$1,23 \times 10^{12}$
Persischer Meerbusen	$1,80 \times 10^{12}$
Zweites atlantisches Kabel	$3,42 \times 10^{12}$
Hoopers Kabel im Persischen Golf	$74,7 \times 10^{12}$
Guttapercha bei 24°C.	$3,53 \times 10^{12}$

236. Die folgende Tabelle, die aus den Experimenten von Buff ²⁾ berechnet ist, gibt den Widerstand eines Kubikmeters Gas in Ohms bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	Widerstand
200°C.	227 000
250°C.	13 900
300°C.	1 480
350°C.	1 035
400°C.	735

237. Varley ³⁾ hat vor einigen Jahren den Durchgang eines Stromes durch verdünnte Gase untersucht, und er findet, daß die elektromotorische Kraft E gleich einer Konstanten E_0 ist, plus einem

¹⁾ Jenkins Cantor Lectures.

²⁾ Annalen der Chemie und Pharmacie, 90, 257 (1854).

³⁾ Proc. R. S., Jan. 12. 1871.

Teile, der von dem Strome nach dem Ohmschen Gesetz abhängt, also

$$E = E_0 + RC.$$

Zum Beispiel, die elektromotorische Kraft, die erforderlich war, damit der Strom in einer bestimmten Röhre überhaupt beginne, war gleich der von 323 Daniellschen Elementen; aber nachdem der Strom einmal entstanden war, war eine elektromotorische Kraft von 304 Elementen gerade hinreichend, um ihn dauernd zu erhalten. Die Intensität des Stromes, wie sie durch ein Galvanometer gemessen wurde, war proportional der Anzahl der Zellen über 304. So war für 305 Zellen die Ablenkung 2, für 306 war sie 4; für 307 war sie 6 und so weiter bis 380 oder $304 + 76$, wobei die Ablenkung war 150 oder $76 \times 1,97$.

Aus diesen Experimenten erkennt man, dafs eine Art von Polarisation der Elektroden stattfindet, deren elektromotorische Kraft gleich der von 304 Daniellschen Elementen ist und dafs bis zu dieser elektromotorischen Kraft die Batterie bloß diesen Polarisationszustand herzustellen sucht. Wenn das Maximum der Polarisation erreicht ist, so wird der Überschufs der elektromotorischen Kraft über die von 304 Elementen dazu verwendet, den Strom nach dem Ohmschen Gesetz zu unterhalten.

Das Gesetz des Stromes in einem verdünnten Gase ist daher sehr ähnlich dem Gesetze der Stromstärke in einem Elektrolyten, in welchem wir die Polarisation der Elektroden in Rechnung zu ziehen haben.

In Verbindung mit diesem Gegenstande müßten wir Thomson's Resultate ¹⁾ studieren, bei welchen die zur Erzeugung eines Funkens in Luft erforderliche elektromotorische Kraft nicht proportional der Entfernung gefunden wurde, sondern proportional der Entfernung plus einer konstanten Gröfse. Die elektromotorische Kraft, die dieser konstanten Gröfse entspricht, kann als die Stärke der Polarisation der Elektroden betrachtet werden.

238. Wiedemann und Rühlmann ²⁾ haben vor einigen Jahren den Durchgang der Elektrizität durch Gase untersucht. Der elektrische Strom wurde von einer Holtzschen Maschine hervorgebracht und die Entladung fand zwischen kugelförmigen Elektroden in einem Metallgefäfs statt, welches das verdünnte Gas enthielt. Die Entladung war im allgemeinen diskontinuierlich und das Zeitintervall zwischen den aufeinanderfolgenden Entladungen wurde mit Hilfe eines Spiegels gemessen, der sich mit der Achse der Holtzschen Maschine drehte. Die Bilder der aufeinander folgenden Entladungen wurden durch ein

¹⁾ Proc. R. S. 1860 oder Reprint of papers Cap. 19.

²⁾ Berichte der Königl. Sächs. Gesellschaft, 20. Okt. 1871.

Heliometer mit geteiltem Objektiv beobachtet, welches so lange eingestellt wurde, bis ein Bild der einen Entladung mit dem andern Bilde der nächsten Entladung zusammenfiel. Durch diese Methode erhielten sie sehr gut übereinstimmende Resultate. Sie fanden, daß die Menge der Elektrizität bei jeder Entladung unabhängig von der Stärke des Stromes und von dem Material der Elektroden ist und daß sie abhängt von der Natur und Dichtigkeit des Gases und von dem Abstände und der Form der Elektroden.

Diese Untersuchungen bestätigen ferner die Behauptung von Faraday¹⁾, daß die elektrische Spannung (s. Art. 46), die dazu erforderlich ist, damit eine disruptive Entladung an der elektrischen Oberfläche eines Leiters beginnt, ein wenig kleiner ist, wenn die Elektrisierung eine negative ist, als wenn sie eine positive ist, daß aber, wenn die Entladung einmal vor sich geht, viel mehr Elektrizität bei jeder Entladung übergeht, wenn sie an einer positiven Oberfläche beginnt. Diese Untersuchungen scheinen also auch die Hypothese zu stützen, daß die an der Oberfläche der Elektrode kondensierte Gasschicht eine wichtige Rolle bei der Erscheinung spielt, und sie zeigen an, daß diese Kondensation an der positiven Elektrode eine grössere ist.

Anmerkung über die Wheatstonesche Brücke.

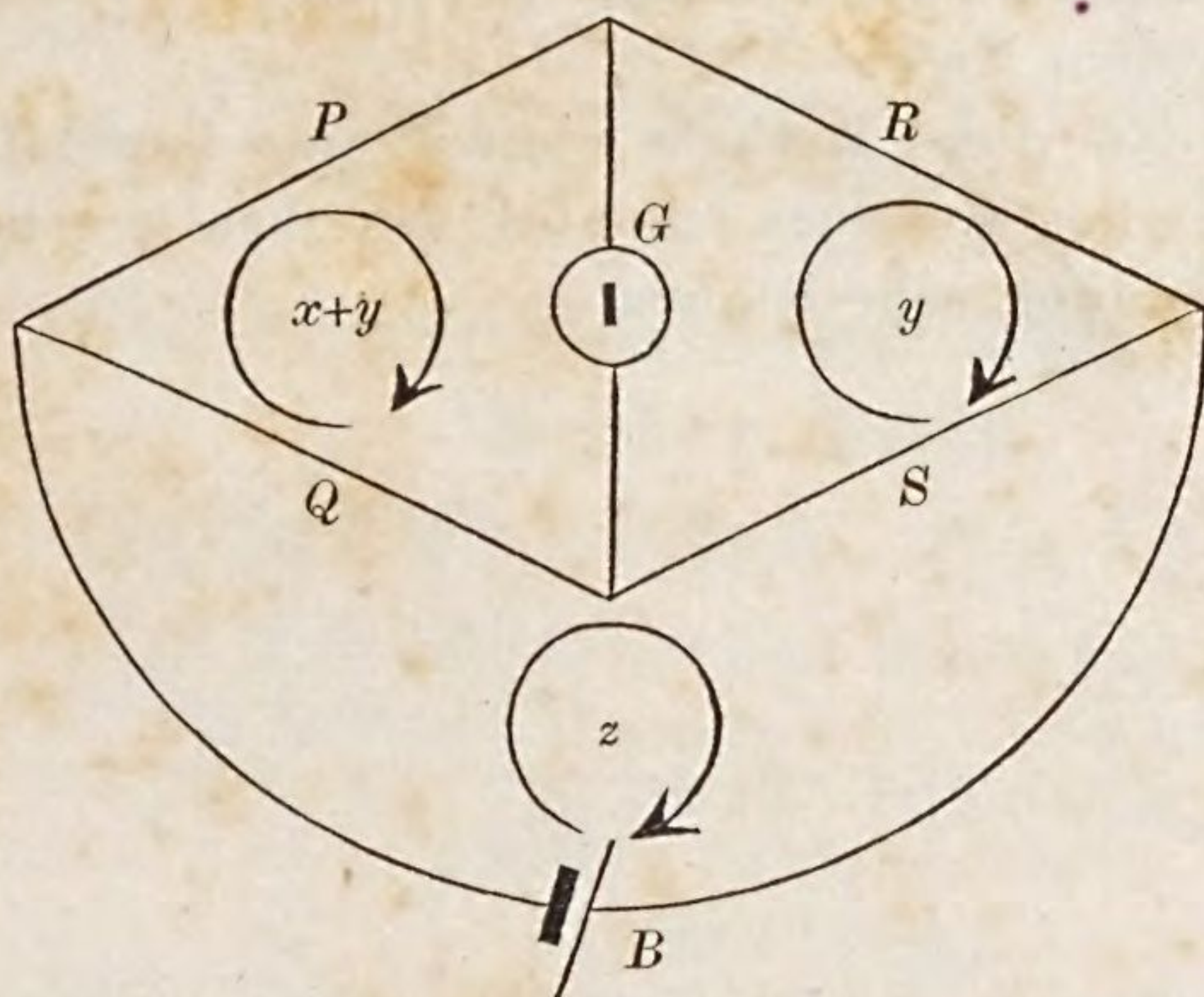
Die folgende Methode, den Strom in dem Galvanometer der Wheatstone'schen Brücke zu bestimmen, wurde von Professor Maxwell in seinem letzten Zyklus von Vorlesungen angegeben, und sie ist ein gutes Beispiel für die Behandlung eines Systems von linearen Leitern. Sie wurde dem Herausgeber der englischen Ausgabe von Professor J. A. Fleming vom University College, Nottingham, mitgeteilt. Die Methode nimmt einfach das Ohmsche Gesetz für jeden Leiter an und nimmt ferner an, daß die gesamte elektromotorische Kraft in einem ganzen linearen Stromkreise die Summe der elektromotorischen Kräfte in den verschiedenen Leitern ist, die den Stromkreis bilden, und daß sie daher gleich der Summe der Produkte aus dem Widerstande jedes Leiters in die Stärke des Stromes, der in ihm fließt, ist, die Ströme der Reihenfolge nach genommen.

Es mögen P , Q , S , R , G und B (s. Fig. 53 a. f. S.) die Widerstände in den einzelnen Leitern sein, welche die Brückenverzweigung bilden, und sie mögen so angeordnet sein, wie es die Figur angibt. Man kann nun die sechs Leiter so ansehen, als bildeten sie drei unabhängige Stromkreise, nämlich $P G Q$, $R S G$ und $Q S B$. Es mögen $x + y$, y und z die Stromstärken in diesen Kreisen sein, wobei angenommen

¹⁾ Exp. Res. 1501.

wird, daß jeder Strom in der Richtung fließt, die durch die Pfeile angegeben ist. Dann ist der wirkliche Strom in Q gleich $z - x - y$, der in S gleich $z - y$ und der in G gleich x und die elektromotorische Kraft zwischen den Endpunkten von Q ist $Q(z - y - x)$ und so weiter für die anderen Leiter. Von den drei oben genannten

Fig. 53.



Stromkreisen ist in den ersten beiden eine elektromotorische Kraft gleich Null, während sie in dem dritten Kreise gleich E ist, gleich der elektromotorischen Kraft der Batterie. Wenn wir daher das Ohm'sche Gesetz der Reihe nach auf jeden Stromkreis anwenden, so haben wir

$$\left. \begin{aligned} (P + G + Q) \overline{x + y} - G y - Q z &= 0 \\ (R + S + G) y - S z - G \overline{x + y} &= 0 \\ (Q + S + B) z - S y - Q \overline{x + y} &= E \end{aligned} \right\} \quad \cdot \quad (I)$$

oder

$$\left. \begin{aligned} (P + G + Q) x + (P + Q) y - Q z &= 0 \\ - G x + (R + S) y - S z &= 0 \\ - Q x - (S + Q) y + (Q + S + B) z &= E \end{aligned} \right\} \quad \cdot \quad (II)$$

Durch Auflösung nach x erhalten wir

$$x = \frac{E \begin{vmatrix} P + Q & -Q \\ R + S & -S \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{E(QR - PS)}{\Delta},$$

wo Δ die Determinante des Systems der Gleichungen (II) ist.

Die Bedingung dafür, daß in dem Galvanometer kein Strom vorhanden ist, ist $x = 0$ oder

$$QR - PS = 0, \text{ oder } \frac{P}{Q} = \frac{R}{S}.$$

Um die Gleichungen (I) für die Ströme zu erhalten, hat man die Regel:

Man multipliziere die in jedem Kreise angenommene Stromstärke mit der Summe aller Widerstände, welche diesen Kreis umgeben, subtrahiere von diesem Produkt die Stromstärken in den benachbarten Kreisen, jede multipliziert mit dem zugehörigen Widerstande, der die Kreise trennt, und setze das Resultat gleich der elektromotorischen Kraft in dem Kreise.

Man sieht, daß diese Methode einfach eine Anwendung des zweiten Kirchhoffschen Gesetzes ist, aber die oben gegebene Vorschrift ist für die Anwendung sehr bequem.

Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn in Braunschweig.

Theorie der Wärme.

Von J. Clerk Maxwell. M. A.

LL. D. Edin. F. R. SS. L. & F. Ehrenmitglied des Trinity College und Professor
der Experimentalphysik an der Universität Cambridge.

Autorisirte deutsche Ausgabe. Uebersetzt nach der vierten Auflage
des Originals von

Dr. Fr. Neesen,

Professor der Physik an der vereinigten Artillerie- und Ingenieurschule
zu Berlin und Privatdocent an der Universität Berlin.

Mit in den Text eingedruckten Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 6 *M.* 40 *g*

Elektrotechnische Bibliothek.

Erster Band.

Die elektrische Beleuchtung in systematischer Behandlung.

Construction und Betriebsverhältnisse der Lichtmaschinen, elektrischen
Lampen und Kerzen. Für Ingenieure, Architekten, Industrielle und das
gebildete Publicum von

A. Merling,

Kaiserlicher Provinzial-Telegraphen-Director (Oberregierungsrath) z. D.,
Docent der Elektrotechnik an der Königlichen technischen Hochschule zu Hannover,
Ritter des Rothen Adler-Ordens III. Klasse mit der Schleife.

Mit zahlreichen in den Text eingedruckten Holzstichen. 8. geh. Preis 16 *M.*

Die folgenden Bände werden enthalten:

- II. Band: Die elektrischen Uhren,
- III. Band: Das elektrische Signalwesen,
- IV. Band: Die elektrische Kraftübertragung (Kraftmaschinen),
- V. Band: Die Telephonie,
- VI. Band: Die Blitzableiter der Gebäude und zum Schutz elektro-
technischer Einrichtungen,
- VII. Band: Die elektrische Sprengtechnik, und
- VIII. Band: Alle sonstigen Anwendungen der Elektrizität zu tech-
nischen Zwecken.

Die mechanische Wärmetheorie.

Von R. Clausius.

Zweite umgearbeitete und vervollständigte Auflage des unter
dem Titel „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie“ erschie-
nenen Buches.

Erster Band. Entwicklung der Theorie, soweit sie sich aus den beiden
Hauptsätzen ableiten lässt, nebst Anwendungen. Mit in den Text ein-
gedruckten Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 8 *M.*

Zweiter Band. Anwendung der der mechanischen Wärmetheorie zu Grunde
liegenden Principien auf die Elektrizität. gr. 8. geh. Preis 6 *M.* 40 *g*

Elektricität und Magnetismus

von Fleeming Jenkin.

Mit besonderer Bewilligung des Autors ins Deutsche übertragen von

Dr. Franz Exner,

a. ö. Professor der Physik an der Universität zu Wien.

Mit in den Text eingedruckten Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 9 *M.*

Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn in Braunschweig.

Substanz und Bewegung.

Von J. Clerk Maxwell.

Ins Deutsche übersetzt von Dr. Ernst v. Fleischl.

Mit Bewilligung des Autors und der Society for promoting Christian Knowledge.

Zweiter Abdruck. Mit Holzstichen. 8. geh. Preis 1 *M.* 20 *S.*

Handbuch der Elektrizitätsmessungen

von H. R. Kempe.

Aus dem Englischen übertragen von

J. Baumann,

technischer Assistent bei der Generaldirektion der bayrischen Verkehrsanstalten.

Mit in den Text eingedruckten Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 8 *M.*

Müller-Pouillet's

Lehrbuch der Physik und Meteorologie.

Achte umgearbeitete und vermehrte Auflage bearbeitet von

Dr. Leop. Pfaundler,

Professor der Physik an der Universität Innsbruck.

In drei Bänden. Mit gegen 2000 in den Text eingedruckten Holzstichen, Tafeln, zum Theil in Farbendruck, und einer Photographie. gr. 8. geh.

Preis zus. 39 *M.*

Die galvanischen Elemente von Volta bis heute.

Eine gemeinfassliche Abhandlung nach der „*Traité élémentaire de la pile électrique*“ par Alfred Niaudet.

Deutsch bearbeitet und mit Zusätzen versehen von

W. Ph. Hauck.

Mit 95 in den Text eingedruckten Holzstichen. gr. 8. geh. Preis 7 *M.*

Handbuch der mechanischen Wärmetheorie.

Mit theilweiser Benutzung von É. Verdet's *Théorie Mécanique de la Chaleur* bearbeitet von

Dr. Richard Rühlmann,

Professor am Königlichen Gymnasium zu Chemnitz.

Mit in den Text eingedruckten Holzstichen. gr. 8. Fein Velinpapier. geh.

I. Band. Preis 20,80 *M.* — II. Band. 1. und 2. Lieferung. Preis 15,20 *M.*

Die Lehre von der Elektrizität

von Gustav Wiedemann.

Zugleich als dritte völlig umgearbeitete Auflage der Lehre vom Galvanismus und Elektromagnetismus.

Erster und zweiter Band. Mit zahlreichen in den Text eingedruckten Holzstichen und zwei Tafeln. gr. 8. geh. Preis 45 *M.*

(Band III. und IV., Schluss des Werkes, befinden sich unter der Presse.)

Maxwell, James Clerk,

Die Elektrizität in elementarer Behandlung

Braunschweig 1883

Phys.sp. 453 ch

urn:nbn:de:bvb:12-bsb11881864-0